



Rüzgar Türbinlerinin Mikro Düzeyde Yer Seçimi için Navier-Stokes Akış Çözücüsünün Topografik Yapısız Çözüm Ağlarında Geliştirilmesi ve Kullanılması

Program Kodu: 1001

Proje No: 112M104

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. İsmail H. TUNCER

Araştırmacı:

Yar. Doç. Dr. Gökhan AHMET

Bursiyerler:

Engin LEBLEBİCİ

Tansu SEVİNE

Tezcan ÜNLÜ

TEMMUZ 2015
ANKARA

1 ÖNSÖZ

TÜBİTAK tarafından desteklenen “112M104” numaralı “Rüzgar Türbinlerinin Mikro Düzeydeki Yer Seçimi İçin Navier-Stokes Akış Çözücünün Topoğrafik Yapısız Çözüm Ağlarında Geliştirilmesi Ve Kullanılması” projesinde; ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümünde geliştirilmekte olan HYP3D akış çözücüsü ile orta ölçekli (meso scale) hava tahminlerinde kullanılan WRF yazılımı akuple edilerek yüksek çözünürlüklü, mikro ölçekli (micro scale) atmosferik akış çözüm yöntemi geliştirilmiş ve doğrulama çalışmaları yapılmıştır. WRF global hava tahminlerinde kullanılan, gözlem verileriyle sürekli bir şekilde güncellenen düşük çözünürlüklü, yeryüzünü eşbasınç seviyeleri ile modelleyen bir atmosferik akış çözücüsüdür. HYP3D ise yapılı ve yapısız çözüm ağları ile paralel hesaplama ortamında çalışabilen 3 boyutlu Navier-Stokes denklemleri çözücüsüdür. Bu projenin amacı düşük çözünürlüklü WRF akış çözümleri ile yeryüzü topoğrafyasının istenilen çözünürlükte modellendiği küçük ölçekli alanlardaki Navier-Stokes çözümlerini sınır koşulları ile akuple etmektir. Bu projede geliştirilecek olan akuple çözüm yöntemleri mikro ölçekli rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde, rüzgar türbinleri için yer seçiminde (micro-siting) ve rüzgar türbinlerinin ileriye dönük, kısa süreli (günlük/haftalık) enerji üretim tahminlerinin elde edilebilmesinde kullanılabilecektir.

İÇİNDEKİLER

1	ÖNSÖZ	2
2	TABLO VE ŞEKİL LİSTESİ.....	4
3	ÖZET & ABSTRACT	6
3.1	Özet	6
3.1	Abstract	7
4	SONUÇ RAPOR ANA METNİ	8
4.1	Giriş.....	8
4.2	Literatür Özeti.....	9
4.3	Yöntem	13
4.3.1	Weather Research Forecast Modeli (WRF)	13
4.3.2	HYP3D Navier-Stokes Akış Çözücüsü	18
4.3.3	WRF ve HYP3D Akış Çözücülerinin Akuple Çalışması (Coupling)	28
4.3.4	Rüzgar Güç Potansiyeli Değerlendirmesi.....	30
4.4	Bulgular ve Yorumlar	34
4.4.1	HYP3D'nin Laminar Ve Türbülanslı Akışlar İçin Doğrulanması	34
4.4.2	HYP3D-WRF Akuple Çözüm Yönteminin Doğrulanması	37
4.4.3	WRF ve HYP3D Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	42
4.4.4	Paralel İşlem Verimliliği	46
4.4.5	Uzun Dönemli Hesaplamalar ve Yıllık Rüzgar Alanı Değerlendirmeleri.....	46
4.5	Sonuç	63
4.6	Referanslar	65

2 TABLO VE ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 4.1 Ticari rüzgar değerlendirme yazılımlarının bölümsel (sector-wise) simülasyonları.....	10
Şekil 4.2 η -temelli koordinat sisteminde η seviyeleri.....	14
Şekil 4.3 İç içe geçmiş WRF çözüm ağlarının Türkiye coğrafyası üzerinde gösterimi	15
Şekil 4.4 Trilineer interpolasyon.....	16
Şekil 4.5 Dörtgen prizma akış alanı içinde ters uzaklık interpolasyon dağılımı $E=9$	17
Şekil 4.6 Dörtgen prizma akış alanı içinde trilineer interpolasyon dağılımı	17
Şekil 4.7 Dörtgen prizma akış alanı içinde ters uzaklık interpolasyon yörünge üzerinde dağılımı $E=9$	17
Şekil 4.8 Dörtgen prizma akış alanı içinde trilineer interpolasyon yörünge üzerinde dağılımı	17
Şekil 4.9 Geliştirilen interpolasyon rutinini Tecplot ile karşılaştırması	18
Şekil 4.10 HYP3D akış çözücüsü işlem süreci.....	21
Şekil 4.11 Ayrıklaştırılmış HYP3D çözüm alanı örneği (16 çekirdek).....	22
Şekil 4.12 HYP3D için yapısız çözüm ağı örneği	27
Şekil 4.13 HYP3D için yapısal çözüm ağı örneği	27
Şekil 4.14 HYP3D için hibrit çözüm ağı örneği	27
Şekil 4.15 WRF ile HAD çözücüsü HYP3D'nin etkileşimli çalıştırılması	28
Şekil 4.16 HYP3D ile WRF çözüm ağlarındaki yer yüzeyleri farkı.....	28
Şekil 4.17 WRF' de tanımsız alanlar için akış değişkenlerinin tanımlanması (kaydırma yöntemi)	29
Şekil 4.18 WRF' de tanımsız alanlar için akış değişkenlerinin tanımlanması (yerel esnetme yöntemi)	30
Şekil 4.19 Rüzgar yön ve hızının simülasyon sırasında sınıflandırılması	30
Şekil 4.20 Ölçek katsayısının etkisi	31
Şekil 4.21 Şekil katsayısının etkisi	32
Şekil 4.22 Weibull dağılımı	32
Şekil 4.23 Rüzgar gülü.....	32
Şekil 4.24 HYP3D akış çözücüsünde kullanılan çözüm ağı ve sınır koşulları	34
Şekil 4.25 Çözümün kalıntı grafiği ve yüzeye dik yöndeki hız dağılımı	35
Şekil 4.26 Farklı iterasyonlarda elde edilen sonuçların Blasius hız profili ile karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.27 Spalart-Allmaras türbülans modeli kalıntı yakınsaması	36
Şekil 4.28 Spalart-Allmaras modeli ile elde edilen düz plaka üzerinde türbülanslı sınır tabaka profili.....	37
Şekil 4.29 WRF yer sınırının HYP3D yer sınırından yüksekte olduğu durumda rüzgar hızı profilleri.....	38
Şekil 4.30 WRF yer sınırının HYP3D yer sınırından alçakta olduğu durumda rüzgar hızı profilleri.....	38
Şekil 4.31 Alınan kesitlerin çözüm alanıyla uyumu.....	39
Şekil 4.32 Doğu-batı ve kuzey-güney yönünde alınan kesitlerdeki rüzgar hızı.....	39
Şekil 4.33 Yapısız çözüm ağlarıyla elde edilen HYP3D çözümlerinin WRF sonuçları ve gözlem verileriyle kıyaslanması	40
Şekil 4.34 Hibrit çözüm ağlarıyla elde edilen HYP3D çözümlerinin WRF sonuçları ve gözlem verileriyle kıyaslanması	40
Şekil 4.35 Yapısal çözüm ağlarıyla elde edilen HYP3D çözümlerinin WRF sonuçları ve gözlem verileriyle kıyaslanması	41
Şekil 4.36 Çözüm alanında kıyaslama yapılan noktalar	42
Şekil 4.37 Doğu-batı kesiti boyunca WRF-HYP3D çözümleri arasındaki rüzgar hızı farkı	44

Şekil 4.38 Kuzey-güney kesiti boyunca WRF-HYP3D çözümleri arasındaki rüzgar hızı farkı	44
Şekil 4.39 WRF ve HYP3D sonuçlarının 8 farklı noktada rüzgar hızı dağılım grafikleri	45
Şekil 4.40 Paralel işlem hızlanma grafiği.....	46
Şekil 4.41 HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [ocak-mart].....	48
Şekil 4.42 HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [nisan-haziran].....	49
Şekil 4.43HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [temmuz-eylül]	50
Şekil 4.44 HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [ekim-aralık]	51
Şekil 4.45 100m yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu haritası	53
Şekil 4.46 80 ve 100 metre yüksekliklerdeki güç potansiyel farkları.....	53
Şekil 4.47 80m yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu haritası	53
Şekil 4.48 Gerçek gözlem verilerinin Weibull dağılımı ve rüzgar gülü.....	54
Şekil 4.49 WRF çözümlerinin Weibull dağılımı ve rüzgar gülü	54
Şekil 4.50 WRF-HYP3D akuple çözümlerin Weibull dağılımı ve rüzgar gülü.....	55
Şekil 4.51 Yerden 80m yükseklikte ölçek (λ) katsayısı dağılımı.....	56
Şekil 4.52 Yerden 80m yükseklikte şekil (k) katsayısı dağılımı.....	56
Şekil 4.53 Yerden 80m yükseklikte ($k\lambda^3$) parametresi dağılımı.....	57
Şekil 4.54 Farklı 2 türbinin güç eğrileri	58
Şekil 4.55 Seçilen noktaların güç yoğunluğu tahmini üzerindeki konumu	59
Şekil 4.56 Seçilen noktaların $k\lambda^3$ dağılımı üzerindeki konumu	59
Şekil 4.57 Seçilen noktaların Weibull dağılımları ve rüzgar gülleri.....	60
Şekil 4.58 Farklı türbinler için normalize edilmiş yıllık enerji üretimi.....	61

3 ÖZET & ABSTRACT

3.1 Özet

Bu çalışmada türbülanslı atmosferik akış çözümlerinin elde edilmesi amacıyla ODTÜ Havacılık ve Uzak Mühendisliği Bölümünde geliştirilmekte olan, paralel hesaplama ortamında çalışabilen 3 boyutlu Navier-Stokes çözücü HYP3D, Mezo ölçekli meteorolojik tahmin yazılımı WRF ile akupile edilerek yüksek çözünürlüklü topografya üzerinde uzun dönemli rüzgar akış alanları ve rüzgar enerji potansiyeli hesaplanmıştır. Numerik çalışmalar bir rüzgar santralinin ve uzun dönemli atmosferik gözlem verilerinin olduğu Mersin-Mut bölgesinde uygulanmış, ve gözlem verileri ile doğrulanmıştır. Bu çözüm bölgesi için yüksek çözünürlüklü (1,5 arcsec, 30m) topografya haritası (DEM) temin edilmiştir. Bu topoğrafya verisi ile yüksek çözünürlüklü, yapı ve hibrit çözüm ağı oluşturulmuştur. HYP3D çözümleri için gerekli sınır koşulları, yaygın olarak kullanılan, açık kaynak kodlu meteorolojik hava tahmin yazılımı WRF ile 1km çözünürlüklü çözüm ağına elde edilen akış çözümlerinden sağlanmıştır.

Akupile çözümler için öncelikle seçilen dar bölgeyi içine alan daha büyük bir bölge için WRF ile uzun dönemli çözümler elde edilmiştir. WRF çözümlerinde kullanılan global ölçekli başlangıç ve sınır koşulları NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Final Analysis (FNL from GFS) (ds083.2 dataset) veri setinden temin edilmiştir. HYP3D çözüm ağına dış hücreleri için gerekli olan zamana bağlı sınır koşulları ise düşük çözünürlüklü WRF çözümlerinden interpolasyon yöntemiyle elde edilmiştir. HYP3D .Navier-Stokes akış çözücüsünde ve meteorolojik tahmin yazılımı WRF 'de kullanılan çözüm ağ yapılarının ve çözünürlüklerin farklı olması sebebiyle, WRF ile hesaplanan akış değişkenlerinin Navier-Stokes çözücüsünün yer yüzüne yakın bazı düğüm noktalarına interpolasyon yapılamamaktadır. Bu çalışmada düşük çözünürlüklü WRF çözüm ağı ile yüksek çözünürlüklü Navier-Stokes çözüm ağına yeryüzüne yakın bölgelerde yaklaşık olarak eşleştirilmesi için iki farklı yöntem denenmiştir. HYP3D yazılımında zamana bağlı sınır koşullarının veri dosyalarından okunarak paralel hesaplama ortamında uygulanması sağlanmıştır. HYP3D'de kullanılan türbülans modeli ile yüzey pürüzlülüğünün etkin bir şekilde modellenebilmesi için var olan Runge-Kutta açık (explicit) çözüm yöntemine ek olarak Simetrik Gauss-Seidel nokta kapalı (point implicit) çözüm yöntemi geliştirilmiş, performans değerlendirilmesi yapılmıştır. WRF ile akupile edilen yüksek çözünürlüklü Navier-Stokes çözümleri bir yıllık bir zaman aralığı için elde edilmiştir. Bu akış çözümlerinde elde edilen yüksek çözünürlüklü rüzgar alanları, rüzgar hızının eşdeğer çizgileri, Weibull dağılımları ve rüzgar gülü grafikleri ile değerlendirilmiştir. Akış değişkenleri,

gerçek gözlem verileri ve WRF sonuçları ile kıyaslanmış, paralel hesaplamalar için performans değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca güç üretim eğrileri verilen örnek rüzgar türbinleri için yıllık enerji üretim haritaları elde edilmiştir.

3.1 Abstract

In this study, parallel 3D Navier-Stokes solver HYP3D which is in development by the METU Department of Aerospace Engineering is coupled with Meso-scale weather prediction model WRF to yield long term wind fields and wind energy potentials over high resolution topography. Numerical studies are done for Mersin-MUT, where a wind farm and long-term atmospheric observation data is present, and results are validated. High resolution (1.5 arc sec ,30m) topographical data (DEM) is obtained for this region. Using this topographical data, high resolution structured and hybrid grids are generated. Boundary conditions necessary for HYP3D are extracted from the 1km resolution solution domain of the widely known, open-source weather prediction software WRF.

For coupled solutions, long-term WRF solutions for a larger region containing the smaller region of interest (MUT) are obtained. Global range boundary and initial conditions for WRF solutions are obtained from NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Final Analysis (FNL from GFS) (ds083.2 dataset) dataset. Spatially and time varying boundary conditions necessary for HYP3D boundary cells are obtained by interpolating the low resolution WRF solution. As resolution of the grids used in Navier-Stokes solver HYP3D and weather prediction software WRF are different, interpolation of some boundary cells near the wall of the Navier-Stokes solver cannot be done. In this study, two different approaches to match the ground levels of both WRF and HYP3D domain are tested. The capability to use unsteady boundary conditions read from data files is attained in parallel computing environment for HYP3D. In order to model surface roughness effectively with the Spalart-Allmaras turbulence model used in HYP3D, Symmetric Gauss Seidel Point Implicit solution algorithm is developed in addition to the Runge-Kutta explicit solution algorithm present in HYP3D. WRF coupled high resolution Navier-Stokes solutions for 1 year duration are obtained. The results obtained from theses high resolution wind fields are assessed with contour plots, Weibull distributions and wind rose graphs. Flow variables are compared with both WRF and real observation data and performance assessments for parallel computing are done. Also, annual wind energy production maps are generated using turbine models for which the power curves are given.

4 SONUÇ RAPOR ANA METNİ

4.1 Giriş

Ülkemizde ve dünyada artan enerji ihtiyacının karşılanmasında kömür, petrol ve doğalgaz gibi karbon temelli yakıtlar yerlerini çevre dostu, yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmaktadır. Rüzgar ve güneş enerjisi bu kaynaklar arasında verimliliği ve kullanım potansiyeli en yüksek olan kaynaklardır. Dağlarla çevrili ve yüksek platoların geniş alanları kapladığı Türkiye coğrafyasında rüzgardan enerji üretim potansiyeli oldukça yüksektir.

Yeni adı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) olan Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) atmosferik gözlem verilerine ve hava tahmin yazılımları ile yapılan simülasyonlara dayalı rüzgar istatistiklerini derlemiş ve Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlasını (REPA) çıkarmıştır. Çok sayıda rüzgar türbininden oluşan rüzgar santrallerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması rüzgar santralleri için yer seçiminin yüksek hassasiyetle yapılmasını gerektirmektedir. Bir rüzgar türbininin konuşlandırılmasındaki 30 metrelik yer değişikliğinin, topoğrafyaya bağlı olarak, elde edilebilecek enerjiyi 2 kat artırabildiği veya azaltabildiği bilinmektedir. Düşük çözünürlüklü rüzgar enerjisi potansiyel atlasları rüzgar santrallerinin makro düzeyde konuşlandırılması için gerekli istatistiksel rüzgar bilgisini sağlamaktadırlar. Ancak rüzgar türbinlerinin seçilen bölgede mikro düzeyde konuşlandırılmaları (micro-siting) için yüksek çözünürlüklü, hassas ve zamana bağlı, rüzgar alanı bilgisine gereksinim vardır. Rüzgar türbinleri için yer seçiminde makro düzeyde seçilen bir bölgenin detaylı topoğrafyası ve rüzgar hızının zamana bağlı değişimi dikkate alınarak yüksek çözünürlükte hava akışı analizlerinin yapılmasını enerji verimliliğinin artırılmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin kısa zaman aralıklarında dalgalanışı entegre elektrik şebekelerinde istenmeyen bir durumdur. Elektrik üretimindeki bu dalgalanmalar Akıllı Şebeke (Smart-Grid) ve yan-üretim (co-generation) gibi alternatifler yaklaşımlarla telafi edilmeye çalışılmaktadır. Diğer bir araştırma alanı ise kısa dönemli atmosferik hava tahminlerinde hassasiyetin artırılarak rüzgar enerji üretimi tahminlerinin iyileştirilmesidir. Elektrik şebekesine verilebilecek enerji miktarının önceden tahmin edilebilmesi üretilen elektriğin birim fiyatını doğrudan etkilediği için rüzgar enerjisi yatırımcılarını doğrudan ilgilendirmektedir. Dolayısıyla, yüksek çözünürlüklü hassas hava tahminlerinin yapılabilmesi elektrik üretimindeki olası dalgalanmalara karşı önlem alınmasını sağlayabilecektir. Bu çalışmada geliştirilecek yöntemler

rüzgar santrallerinin yer seçimine ek olarak kısa dönemli, hassas enerji üretim tahminlerinin yapılabilmesinde de kullanılabilecektir.

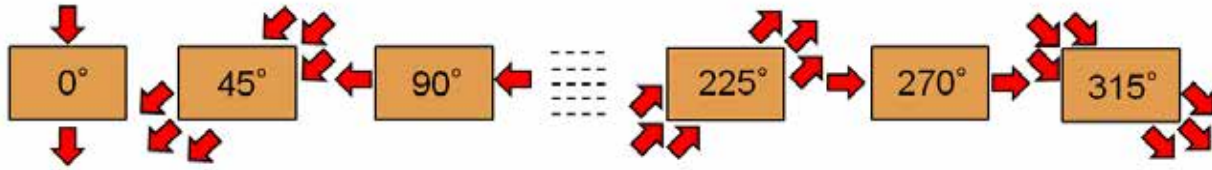
4.2 Literatür Özeti

Rüzgar santralleri için yer seçilmesinde hava tahminlerinde kullanılan atmosferik akış çözümlerine dayalı hesaplamalı yöntemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Cochran vd., 2008; Mortensen vd. 2006; Cochran, 2002). Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) Genel Müdürlüğünün hazırladığı Rüzgar Enerji Potansiyeli Atlası, REPA, hava tahmininde kullanılan yazılımlarla elde edilen verilere dayanmaktadır. Rüzgar tünellerinde yapılan deneysel çalışmalarda ise genelde atmosferik sınır koşullarının sağlanması ve geniş bir bölge için topoğrafik yüzeyin modellenmesi oldukça zordur Derickson vd. (2004). Dolayısıyla, rüzgar atlaslarının hazırlanmasında ve rüzgar santrallerinin konuşlandırılmasında nümerik modellemeler ve veri madenciliği (data mining) önemli bir yer tutmaktadır. (Damiani vd.,2008; Peltier vd., 2006)

Günümüzde bölgesel rüzgar atlaslarına göre belirlenen yörelerde rüzgar türbinlerinin mikro düzeyde konuşlandırılmaları için çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımlardan "The Wind Atlas Analysis and Application Program", WAsP, Danimarka RISO Ulusal Laboratuvarı Rüzgar Enerjisi ve Atmosferik Fizik Bölümü (Wind Energy and Atmospheric Physics Department at Risø National Laboratory) tarafından ilk olarak 1987 yılında yayınlanmış, halen güncellemeleri ve yeni sürümleri çıkarılmaktadır. WAsP düşey ve yatay düzlemlerde düşük çözünürlüklü rüzgar verilerini istatistiksel yöntemlerle değerlendiren, grafik arayüzlü bir yazılımdır Mortensen vd. (2006, 2007). WAsP düşük çözünürlüklü rüzgar verilerinin interpolasyonla kullanımına dayalı olduğu için engebeli dağlık arazilerde veya çeşitli engellerin bulunduğu bölgelerde rüzgar türbinleri için yer seçiminde yetersiz kalmaktadır.

Daha güncel olan WindSim ve MeteoDyn gibi ticari yazılımlar rüzgar akış alanlarının simülasyonunu içinde türbülans modellerini de barındıran ve Navier-Stokes denklemlerinin çözümü ile yapmaktadır. Orta Doğu Teknik Üniversitesinde Havacılık ve Uzay Mühendisliği öncülüğünde kurulan Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde bu tür ticari yazılımlar mevcuttur ve kabiliyetleri incelenmektedir. Ancak bu yazılımlar gerçek zamanlı rüzgar verileri kullanmamaktadır. Bu yazılımlar genel olarak seçilen bölgedeki ölçüm verileriyle elde edilmiş rüzgar gülleri yardımıyla hâkim rüzgar yönlerini tayin eder. Bu yönleri sağlamak üzere çözüm alanına başlangıç ve sınır koşulu olarak belli açısal aralıklarla Şekil 4.1'de de

görüldüğü gibi sabit rüzgar hızları tanımlar. Böylece ilgili alanın içindeki rüzgar hızı dağılımlarını sabit ve zamana bağlı olmayan şekilde ele alarak Navier-Stokes denklemleri ile hesaplar. Bu metotta başlangıç ve sınır koşulları sabit ve zamandan bağımsız verilmektedir. Yapılan bu kabul ciddi hesaplama hatalarına ve gerçek dışı çözümlere sebebiyet verebilir. Leblebici yaptığı çalışmada zamana bağlı başlangıç ve sınır koşullarının küçük zaman aralıklarında incelendiğinde dahi çözüm alanını ciddi bir şekilde değiştirdiğini göstermiştir Leblebici (2012) . Dolayısıyla bu projede daha gerçekçi çözümler elde etmek için Navier-Stokes denklemleri zamana bağlı olarak çözdürülmüştür.



Şekil 4.1 Ticari rüzgar değerlendirme yazılımlarının bölümsel (sector-wise) simülasyonları

Rüzgar türbinlerinin yer seçimindeki hassasiyetin artırılması için günümüzde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics) yöntemleri kullanılması gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Politis vd., 2008; Landberg vd., 2003). Yüksek çözünürlüklü topoğrafyanın modellenenebilmesine imkân sağlayan çözüm ağları üzerinde türbülanslı ve zamana bağlı akışlar için Navier-Stokes çözücülerinin kullanılması ve elde edilen verilerin değerlendirilmesi oldukça güncel bir araştırma konusudur.

F.J Zajackowski nümerik hava tahmin modellerini ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonlarını şöyle kıyaslamaktadır Zajackowski vd. (2011); hava tahmin modelleri ısınım, nemden kaynaklanan taşınım fiziği, satıh etkileri parametreleştirmeleri, atmosferik sınır tabaka fiziği gibi etkileri hesaba katabilirken 1km'den daha fazla, kaba çözüm ağları kullandığı için türbülans fiziğini hesaba katamazlar. Diğer yandan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında binalar ve keskin yüzey şekilleri etrafında oluşan küçük ölçekli akışların ve türbülansın iyi ifade edilebildiğini açıkça ortaya koymuştur. Şehirsel veya karmaşık alanlar için yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarında karşılaşılan en ciddi zorluk sınır koşullarının zamana bağlı verilmesi ve satıh etkilerinin modellenmesidir. P. Strangroom, karmaşık yüzey yapılarının rüzgar hızını ve çeşitli akış davranışlarını ciddi bir şekilde değiştirdiğini göstermiştir Strangroom vd. (2004). Yılmaz, kentsel çözüm alanları için CAD çizimleri oluştururken LIDAR' dan dan faydalanmış, yapısız çözüm ağı üretimi ve akış çözümü

için GAMBIT ve FLUENT yazılımlarını kullanmıştır Yılmaz (2009). M.H Zheng ise yükseklik verileri için GIS (Geographical Information System) verilerini, akış çözücü CFD yazılımı olarak Star-CD'yi kullanmıştır. Fakat bu çalışmalarda orta ölçekli modellere yer verilmemiştir Zheng vd. (2010).

CFD tabanlı rüzgar akış alanlarının belirlenmesi çalışmaları da genelde sınır koşulları zamandan bağımsız hız profilleri uygulanarak ve rüzgarın belirli bir yönden estiği varsayılarak yapılmaktadır. Atmosferik akışlardaki zamana bağlı değişimler yerine orta ölçekli hava tahmin yazılımlarından elde edilen baskın rüzgar yönlerinin incelenmesi nümerik simülasyonlarda hata oranını artırmaktadır Sarma vd. (1999). Montavon atmosferik akış denklemleri ve sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemleri arasındaki uyumsuzluğun üstesinden gelebilmek için kaynak modelleri (source models) kullanmıştır Montavon vd. (1998). Gergely Kristof çalışmasında; kentsel alanlarda yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında dikey akışların; lokal rüzgarlar, atmosferik tabakalaşma gibi önemli akış olaylarına sebep olduğundan bahsetmektedir. Ayrıca Coriolis kuvvetleri de atmosferin üst tabakalarında oldukça etkin olduğu için akış alanı çözülürken hesaba katılması gerektiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada bu etkiler kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (User Defined Functions) aracılığıyla FLUENT yazılımına entegre edilmiş ve atmosferik akış alanı çözümleri üretilmiştir Kristof vd. (2009). Yamada, orta ölçekli hava tahmin programlarıyla kentsel rüzgar alanlarının simülasyonu için hacim momentum kaynakları (volume momentum sources) aracılığıyla bina çevrelerindeki akışların modellenebileceğini belirtmiştir Yamada vd. (2003). Ama elde edilen sonuçlar hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında yetersiz kalmaktadır.

Rüzgar enerjisi üretiminde rüzgar santrallerinin rüzgar potansiyeli en yüksek olan bölgelerde konuşturılması gerekmektedir. Bir rüzgar santralinin yeri seçilirken yüksek çözünürlüklü topoğrafik bilgiye dayalı rüzgar atlaslarının elde edilmesi ve kullanılması rüzgardan elde edilecek enerji verimini artıracaktır. Bu çalışmada atmosferik hava tahmini yazılımları ile elde edilen rüzgar hızlarındaki dakikalık değişiklikler göz önüne alınarak mikro ölçekli bölgeler için uzayda ve zamanda yüksek çözünürlüklü, zamana bağlı rüzgar enerji potansiyeli haritalarının elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu projede; düşük çözünürlüklü, global hava tahminlerinde kullanılan, açık kaynak kodlu WRF yazılımı ile kurum içinde geliştirilmekte olan Navier-Stokes tabanlı, yapısız hibrit çözüm ağlarında çalışan bir akış çözücü akuple edilerek yüzey çözünürlüğü yüksek, zamana bağlı rüzgar akış alanları hesaplanacaktır. Bu proje kapsamında seçilen küçük ölçekli bir rüzgar

santralı bölgesi için yüksek çözünürlüklü topografik yükselti verileri ile yüksek çözünürlüklü çözüm ağıları öncelikle oluşturulacaktır. Bu çözüm bölgesini kapsayan daha büyük ölçekli bir bölge için WRF ile uzun dönemli atmosferik akış simülasyonları yapılacak ve aynı zaman diliminde küçük ölçekli bölge için zamana bağlı sınır koşulları elde edilecektir. Ardından, elde edilen bu sınır koşulları ile yüksek çözünürlüklü, zamana bağlı Navier-Stokes akış çözücüsü, HYP3D, kullanılarak zamana bağlı bölgesel akış çözümleri elde edilecek, bu çözümler içinde rüzgar enerji potansiyelini belirlemek için veri madenciliği yapılacaktır.

Bu proje kapsamında geliştirilecek yazılım ile bölgesel rüzgar enerji potansiyellerinin hesaplanması ve bu verilerin yeni kurulacak rüzgar türbinlerinin yer seçiminde kullanılabilmesine ek olarak aktif rüzgar santralleri için ileriye dönük kısa dönemli enerji üretim tahminlerinin hassas bir şekilde yapılabilmesini de sağlayacaktır. Proje çıktılarının ODTU Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi, RÜZGEM, bünyesinde ticarileşme potansiyeli de oldukça yüksektir.

4.3 Yöntem

Bu projede, büyük ölçekli atmosferik hava tahminlerinde kullanılan düşük çözünürlüklü WRF yazılımı ile küçük ölçekli alanlarda yüksek çözünürlükte sonuç veren, kurum içi geliştirilmekte olan HYP3D Navier-Stokes çözücüsü sınır koşulları aracılığıyla akuple edilmiştir. HYP3D çözümleri için gerekli sınır koşulları WRF çözümlerinden interpolasyon yöntemiyle elde edilmiş, çözünürlük farkından dolayı karşılaşılan güçlükler geliştirilen nümerik yaklaşımlarla aşılmıştır. Uzun dönemli akuple rüzgar alanı çözüm verileri eşdeğer rüzgar enerji potansiyel çizgileri, Weibull dağılımları ve rüzgar gülü grafikleri ile değerlendirilmiştir. Rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde Weibull katsayılarından oluşan yeni bir parametre tanımlanmış ve bu parametrenin dağılımı ile rüzgar türbini karakteristikleri de göz önüne alınarak iki farklı türbin modeli için yer seçimi yapılmıştır, Ahmet (2015).

4.3.1 Weather Research Forecast Modeli (WRF)

Kısa adı WRF olan The Weather Research & Forecasting Model, mezo-ölçekli atmosfer hareketlerini incelemek ve hava tahmini yapmak için tasarlanmış, hidrostatik olmayan (non-hydrostatic), arazi-takipli (terrain-following) ve eta-koordinat temelli bir sınırlı alan modelidir. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.6 (2014). WRF, zamana bağlı akış denklemlerini sonlu farklar yöntemi kullanarak çözer. Çözüm, değişik ölçeklere sahip iç içe geçmiş ağlar (nested grids) üzerinde elde edilebilir. Modelin çözüm yetenekleri geniş bir çözünürlük aralığını (2-200 km), mezo-beta ve mezo-gama ölçeklerini kapsamaktadır. Fortran programlama dili ile geliştirilmiş olan WRF yazılımı açık kaynaklıdır. Dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan WRF, kullanıcılardan gelen katkılar ile halen geliştirilmektedir.

4.3.1.1 WRF Yazılımının Paralel Hesaplama Ortamında Kurulumu ve Verifikasyonu

WRF'in 3.4.1 sürümü RÜZGEM yüksek başarımlı hesaplama bilgisayar kümesine Intel'in Fortran derleyicisi (ifort, Sürüm 12.1.6) ve GNU'nun C (gcc, sürüm 4.4.7) derleyicisi kullanılarak seri ve MPI tabanlı paralel hesaplamalar için derlenmiş ve doğrulanmıştır.

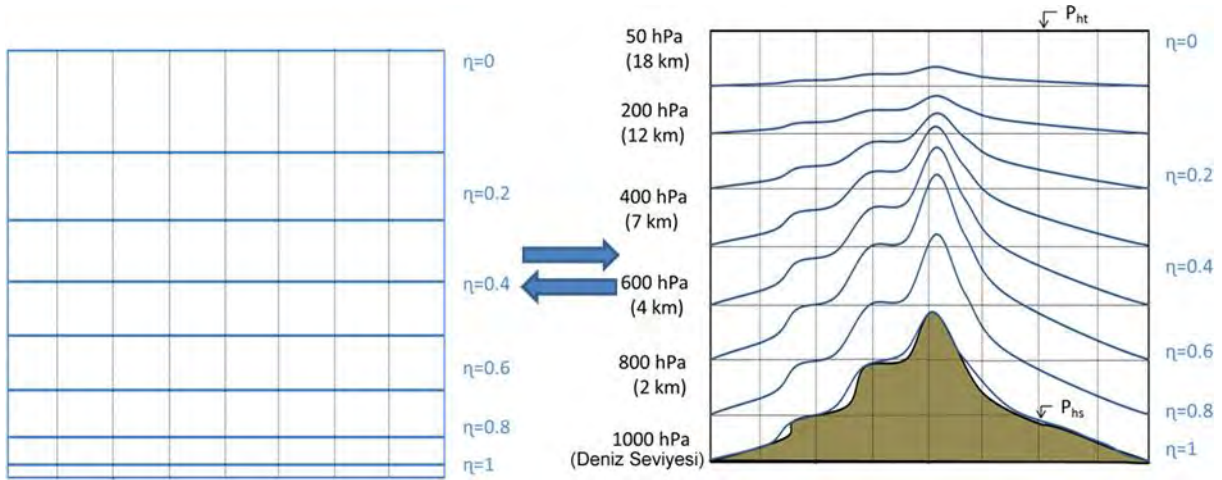
Sayısal hava tahmini (SHT) bir başlangıç/sınır değer problemidir. Hava tahmin modelleri, (tanımlanan başlangıç ve zamana bağlı sınır koşulları ile) zaman içerisindeki atmosferik hava hareketlerini hesaplar ve hava tahmini gerçekleştirilir. Başlangıç ve sınır koşulları sadece daha büyük ölçekli sayısal bir model çözümünden elde edilebileceği gibi yerel gözlem istasyonlarından gelen veriler ile de zenginleştirilebilir. Başlangıç ve sınır koşulları ne kadar

gerçeğe yakınsa, yapılan tahminin doğruluğu da o ölçüde yüksek olacaktır. Günümüzde SHT merkezleri, büyük ölçekli sayısal hava tahmin sonuçlarını ve gözlem istasyonlarından elde edilen verileri uygun bir matematiksel/istatistiksel kombinasyonla birleştirerek başlangıç koşulları oluşturmakta ve küçük ölçekli modellerle daha güvenilir hava tahminlerinde bulunabilmektedirler.

WRF çözüm alanı dikey yönde yeryüzünden yükseklik koordinatı yerine basınç tabanlı Eta (η) ile ifade edilen bir koordinat sistemi kullanmaktadır (Şekil 4.2):

$$\eta = \frac{P - P_{ht}}{P_{hs} - P_{ht}}$$

Burada P atmosferik basınç, P_{hs} yer yüzeyindeki basınç, P_{ht} ise çözüm alanının üst noktasındaki basınçtır. WRF’de nümerik çözümlere stabilite kazandırmak amacıyla kullanılan η -tabanlı koordinat sistemi karmaşık topoğrafyaları temsil etmekte yetersizdir.



Şekil 4.2 η -temelli koordinat sisteminde η seviyeleri

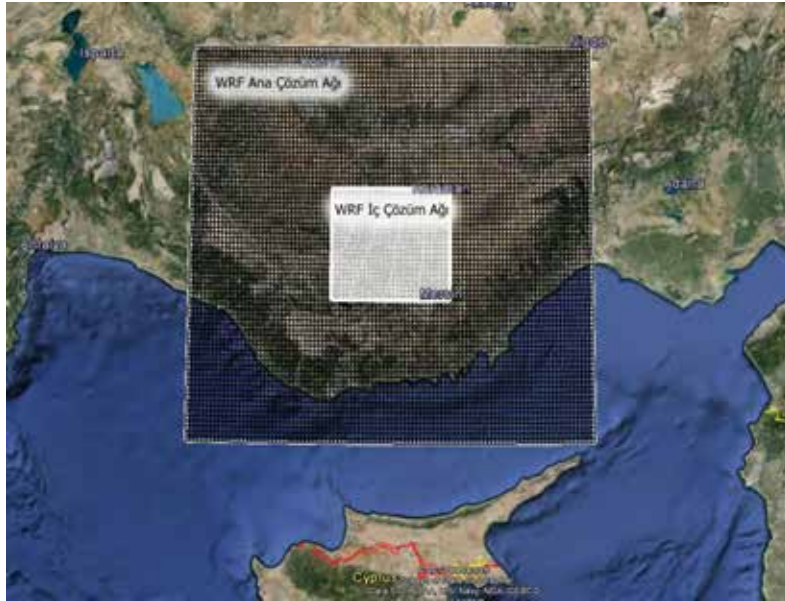
Ayrıca WRF çözümlerinde diğer iki bağımsız koordinat değişkeni enlem ve boylam açıları olarak verilmektedir.

WRF kurulumunu doğrulamak amacıyla 04 Nisan 2010 tarihine ait sınır koşulları kullanılarak, Mersin'in MUT bölgesini merkez alan bir çözüm üretilmiştir. WRF yazılımında simülasyonlar için gereken topoğrafya bilgisi UCAR (University Corporation of Atmospheric Research) sunucusundan, zamana bağlı başlangıç ve sınır koşulları ise GRIB formatında Avrupa orta ölçekli meteorolojik tahmin merkezinden ECMWF (European Centre of Medium Range Weather

Forecast)'en elde edilmiştir. . ECMWF akademik araştırmalarda kullanılmak üzere geçmiş yılların verilerini ücretsiz olarak sunmaktadır.

şekil 4.3 'te WRF çözümünde kullanılan iç-içe geçmiş (nested) özüm ağı görünmektedir. Ana özüm Ağı 100x79x50 düğüm noktasından oluşmakta ve yüzeyde 3km çözünürlüğe sahiptir. WRF İç özüm Ağı olarak gösterilen ağı (Nest) ise, yaklaşık 1 km çözünürlüklü, 88x67x50 düğüm noktasından oluşmaktadır. Yapılan WRF çözümlerinde seçilen opsiyonlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

	Seçilen Opsiyonlar
Mikrofizik	"WRF Single-Moment 6-class scheme"
Uzundalga Işınım	"RRTM scheme"
Kısdalga Işınım	"Dudhia scheme"
Yüzey Katmanı	"MM5 similarity"
Arazi Yüzeyi	"Noah Land Surface Model"
Atmosferik sınır tabaka	"Yonsei University scheme"
Kümüls parametreleştirme	"Kain-Fritsch scheme"



şekil 4.3 İç içe geçmiş WRF özüm ağılarının Türkiye coğrafası üzerinde gösterimi

4.3.1.2 Sınır Koşullarının Interpolasyonu

Geliştirilen akuple çözüm yönteminde HYP3D çözüm ağının dış sınır hücrelerindeki çözüm değişkenleri WRF çözüm ağındaki hücrelerden interpolasyon yöntemiyle elde edilirler. Geliştirilen algorithmada; HYP3D çözüm ağının dış sınır hücre merkezlerinin WRF çözüm ağı içerisinde hangi Kartezyen hücre içine düştüğü bir arama sonucu belirlenir. WRF çözüm ağı içinde, enlem boylam ve yükseklik yönündeki düğüm noktalarının dağılımları doğrusaldır. Dolayısıyla, interpolasyon noktasına en yakın düğüm, tüm yönlerde sırasıyla aranarak belirlenmektedir. Ardından noktanın içine düştüğü çözüm ağı hücresi, düğüm noktasının ortak olduğu hücreler arasında vektörel bir kıyaslama yapılarak belirlenmektedir. İnterpolasyon noktasındaki akış değişkenlerinin hesaplanması, belirlenen hücre içinde iki farklı interpolasyon yöntemiyle incelenmiştir.

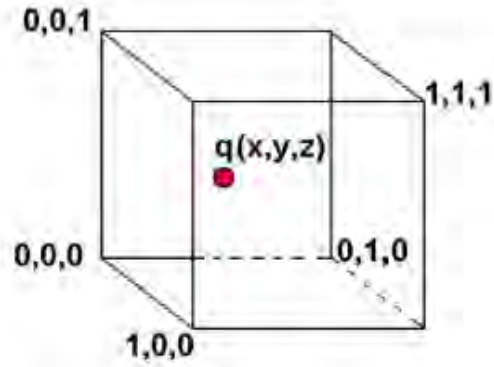
Ters Uzaklık Interpolasyonu: Dörtgen prizma hücrelerde oldukça sık kullanılan bu interpolasyon yöntemi birçok uygulamada başarılı sonuçlar vermekte olup aşağıdaki bağıntıyı kullanmaktadır.

$$\varphi_{hedef} = \frac{\sum W_s * \varphi_{kaynak}}{\sum W_s}$$

Burada Ağırlık Fonksiyonu; $W_s = D^{-E}$ olup, “D” kaynak ile hedef arasındaki mesafe ve “E” ise 3.5 olarak önerilen, fonksiyonun üstel katsayısıdır.

Trilineer İnterpolasyon: Özellikle sonlu eleman uygulamalarında sıkça kullanılan bu interpolasyon yöntemi birim dikdörtgen prizma için aşağıdaki Şekil 4.4’ te verilmektedir: Genel dörtgen prizmalarda köşe düğüm noktalarının koordinatları kullanılır.

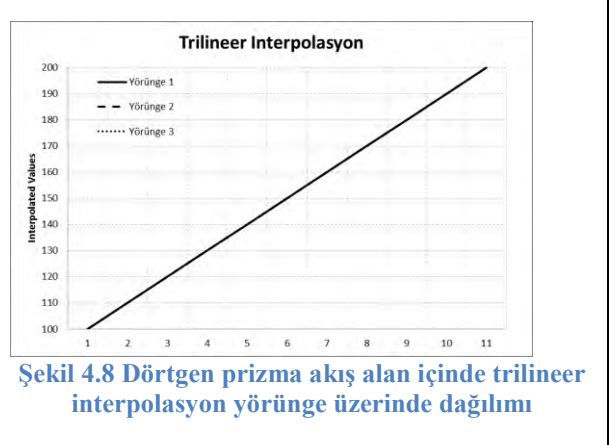
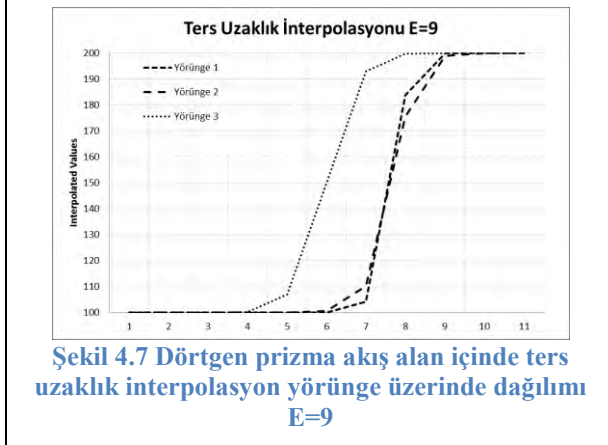
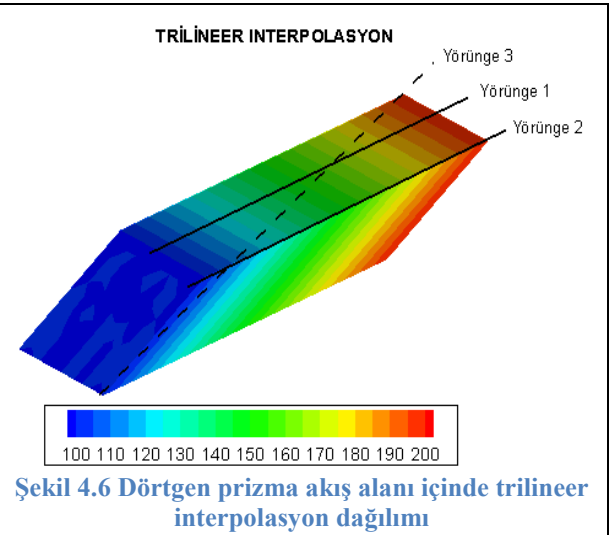
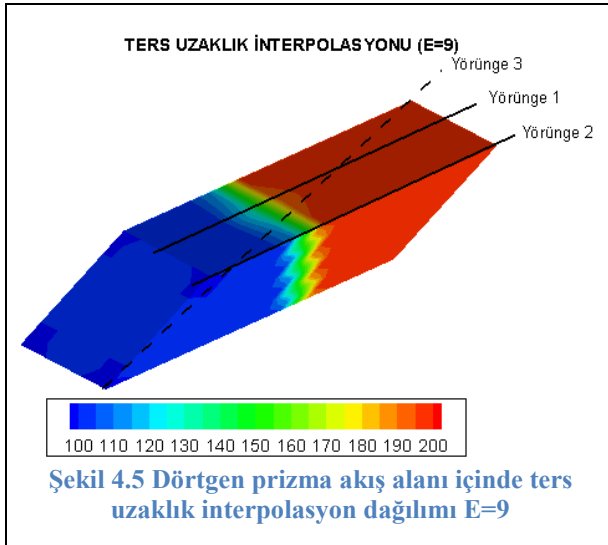
$$\begin{aligned} \varphi_{hedef} = & \varphi_{0,0,0}(1-x)(1-y)(1-z) \\ & + \varphi_{0,0,1}(1-x)(1-y)(z) \\ & + \varphi_{0,1,0}(1-x)(y)(1-z) \\ & + \varphi_{0,1,1}(1-x)(y)(z) \\ & + \varphi_{1,0,0}(x)(1-y)(1-z) \\ & + \varphi_{1,0,1}(x)(1-y)(z) \\ & + \varphi_{1,1,0}(x)(y)(1-z) \\ & + \varphi_{1,1,1}(x)(y)(z) \end{aligned}$$



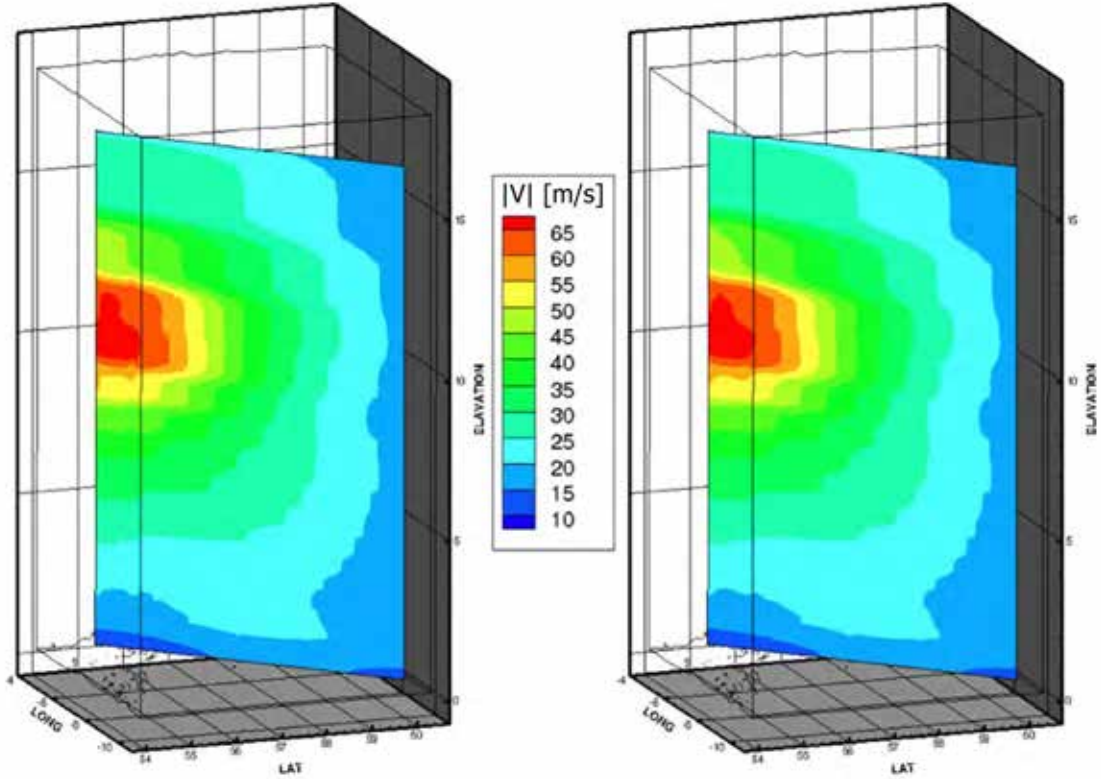
Şekil 4.4 Trilineer interpolasyon

Bu interpolasyon yöntemlerinin eğik kare prizma bir akış alanı içinde 3 farklı yörünge üzerindeki dağılımları Şekil 4.5 - Şekil 4.8 'da gösterilmektedir.

Ters uzaklık interpolasyonunda kullanılan bağıntı gereği yörünge boyunca veriler lineer olmayan bir değişim göstermektedir. Diğer yandan Trilineer interpolasyon yönteminde ise beklenen lineer değişim elde edilir. Ters uzaklık yaklaşımı kolay uygulanabilir olmasına rağmen, lineer değişimlerdeki hatalı interpolasyondan dolayı, bu çalışmada trilineer interpolasyon yöntemi kullanılmıştır.



İnterpolasyon algoritmasının doğrulanması amacıyla , WRF çözüm alanı içerisinde diagonal bir yüzey yaratılmış; bu yüzey üzerinde geliştirilen trilineer interpolasyon algoritması ile elde edilen hız değişkeninin dağılımı tecplot ile elde edilen dağılımla Şekil 4.9 'da başarılı bir şekilde karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.9 Geliştirilen interpolasyon rutininin Tecplot ile karşılaştırması

4.3.2 HYP3D Navier-Stokes Akış Çözücüsü

Havacılık ve Uzay Mühendisliğinde geliştirilmekte olan HYP3D yazılımı 3 boyutlu, yapılı, yapısız veya hibrit çözüm ağları üzerinde Navier-Stokes denklemlerini Sonlu Hacimler (Finite Volume) yöntemiyle paralel olarak çözen bir akış çözücüsüdür. Yazılım türbülanslı akışlar için Spalart-Allmaras modelini kullanmaktadır. FORTRAN dilinde yazılmış olan çözücünün temel özellikleri şunlardır:

- Zaman integrasyonunda açık (explicit) 3 aşamalı Runge-Kutta (RK3) metodu kullanır. Daimi akışlarda hücre büyüklüğü ile orantılı değişken zaman adımı kullanılabilir. Zamana bağlı akışlarda ($CFL < 2$) sınırlaması vardır.
- Akı (flux) hesaplamaları birinci derece hassasiyetli Roe-flux şeması ile yapılır.
- Spalart-Allmaras türbülans modeli vardır.

- Paralel hesaplamalar çözüm ağının bölünmesi yöntemine (domain decomposition) dayalıdır
 - Paralel hesaplama ortamındaki işlemci sayısına göre yapısız çözüm ağı açık kaynaklı METIS yazılımı kullanılarak bölünür Karypis ve Kumar (1999), ve bölünen alt çözüm ağlarındaki sınır hücreleri arasında iletişim şeması oluşturulur.
 - İşlemciler arası iletişim PVM (Parallel Virtual Machine) yazılım kütüphanesi kullanılarak sağlanır.
 - Yönetici-işçi (master-worker) paralel işlem algoritması kullanılır. Yönetici girdi/çıkı işlemlerini, verilerin işçilere dağıtımını ve işçiler arasında senkronizasyonu sağlar.
 - İşçi işlemciler alt çözüm ağlarında zaman integrasyonu için nümerik çözüm algoritmasını uygular, ve komşu alt ağların işlemcileri ile alt ağlar arası (intergrid) sınır koşullarının her zaman adımında alışverişini sağlar.

HYP3D çözüm ağı doğu-batı ve kuzey-güney koordinat yönlerinde metre birimi kullanmaktadır. Akuple çözümlerde yapılan sınır koşullarının interpolasyonunda WRF' de kullanılan açısız enlem ve boylam koordinatları ile η koordinatı metrik sisteme dönüştürülerek kullanılmaktadır.

4.3.2.1 HYP3D Korunum Denklemleri

HYP3D yazılımı 3 boyutlu Navier-Stokes denklemlerinin integral formunu sonlu hacimler yöntemiyle çözer:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \vec{Q} d\Omega + \oint_S (\vec{F}_c - \vec{F}_v) dS = 0$$

Burada Q birim hacimde korunan akış değişkenleridir (kütle, x, y, z momentumu, enerji); \vec{F}_c konvektif akı; \vec{F}_v ise viskoz akı vektörleridir.

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e_t \end{pmatrix}$$

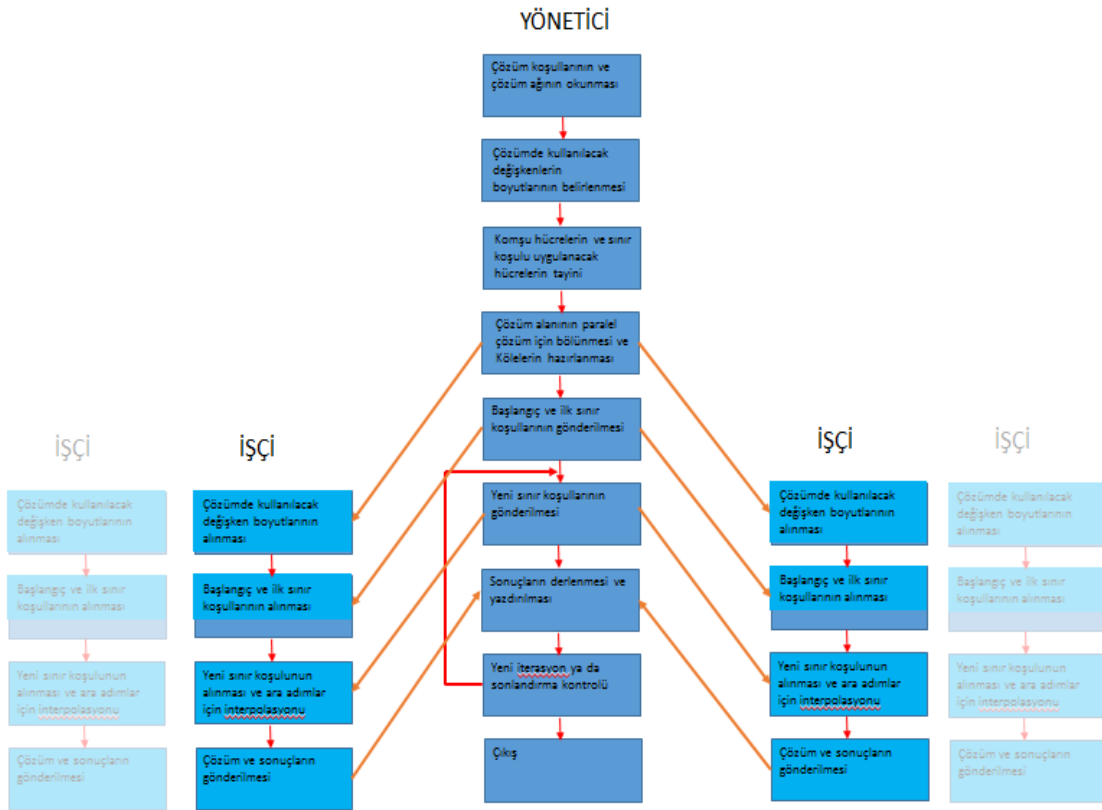
$$\vec{F}_c = \begin{pmatrix} \rho u \vec{i} + \rho v \vec{j} + \rho w \vec{k} \\ (\rho u^2 + P) \vec{i} + \rho uv \vec{j} + \rho uw \vec{k} \\ \rho vu \vec{i} + (\rho v^2 + P) \vec{j} + \rho vw \vec{k} \\ \rho wu \vec{i} + \rho wv \vec{j} + (\rho w^2 + P) \vec{k} \\ u(\rho e_t + P) \vec{i} + v(\rho e_t + P) \vec{j} + w(\rho e_t + P) \vec{k} \end{pmatrix}$$

$$\vec{F}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \vec{i} + \tau_{xy} \vec{j} + \tau_{xz} \vec{k} \\ \tau_{xy} \vec{i} + \tau_{yy} \vec{j} + \tau_{yz} \vec{k} \\ \tau_{xz} \vec{i} + \tau_{yz} \vec{j} + \tau_{zz} \vec{k} \\ \theta_x \vec{i} + \theta_y \vec{j} + \theta_z \vec{k} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} + k \frac{\partial T}{\partial x} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} + k \frac{\partial T}{\partial y} \\ u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz} + k \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix}$$

4.3.2.2 HYP3D Çözüm Algoritması

HYP3D yazılımının çözüm algoritması Şekil 4.10'de verilmektedir. HYP3D yazılımı yönetici ve işçi olarak çalışan iki ayrı çalıştırılabilir modülden (executable) oluşmaktadır. İşçi işlemlerinin (process) sayısı paralel hesaplama ortamındaki kullanılabilir işlemci sayısı kadar artırılabilir. HYP3D paralel çözüm algoritması çözüm ağının olabildiğince eşit olarak bölünmesi ve her alt ağdaki çözümün farklı bir işçi aracılığıyla çözülmesine dayanmaktadır. Yönetici işlem çözüm girdilerin okunması, çözüm ağının bölünmesi, işçilerin organizasyonu ve çıktıların derlenmesi gibi işleri yürütür. İşçiler ise kendi çözecekleri alt çözüm ağı bilgilerini, başlangıç ve sınır koşullarını yöneticiden alarak kendi alt ağları üzerindeki akış çözümünü gerçekleştirir. Her zaman adımında alt ağlar arası sınır koşulları alınıp verilerek alt ağlar arasındaki çözümün sürekliliği sağlanır.

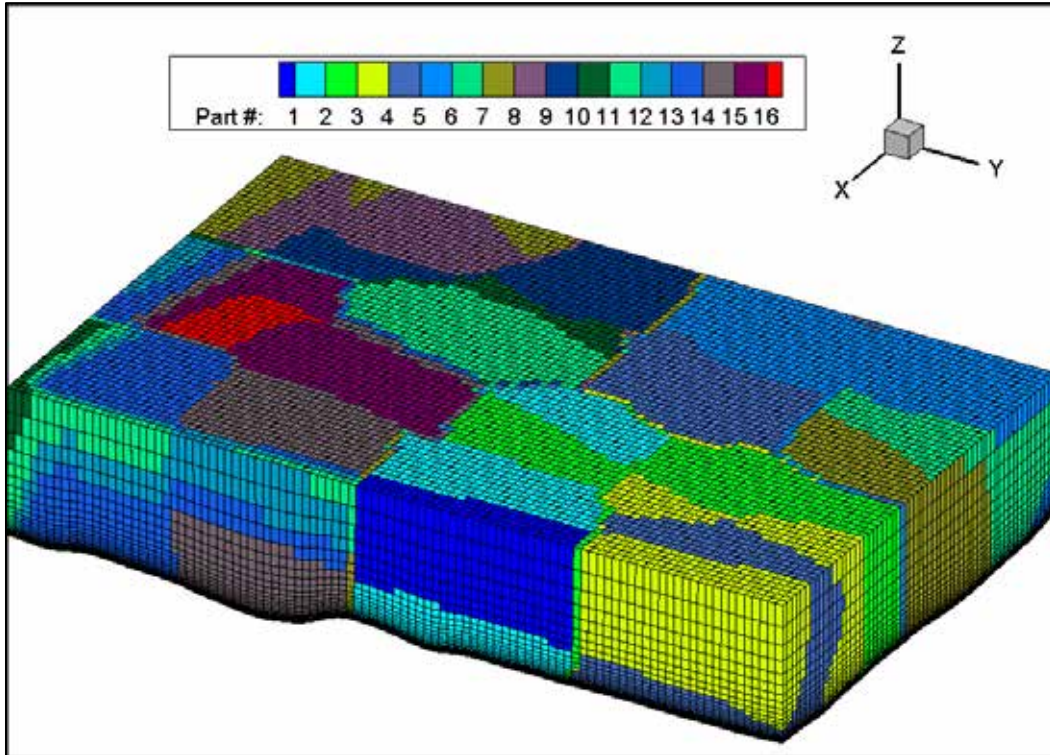


Şekil 4.10 HYP3D akış çözücüsü işlem süreci

Çözüm alanının sınırlarının olduğu alt ağlarda ise sınır koşulları uygulanır. Ancak bu projede sınır koşullarının WRF çözümlerinden alınan verilerle zamana bağlı olarak değişmesi sağlanmıştır. Dış (farfield) sınır koşulları WRF çözümlerinden interpolasyon yöntemiyle öncelikle elde edilmekte ve paralel hesaplama ortamında işçi işlemlere iletilmektedir. Yönetici, öncelikle yapılacak simülasyonun parametrelerini (laminar-türbülans, Reynolds sayısı, zaman adımı sayısı, çözüm yöntemi, kullanılacak işçi sayısı, vb) ve çözüm ağını oluşturan düğüm noktalarını tanımlı veri dosyalarından okur. Çözüm ağının boyutuna göre Fortran dizileri için bellekte yer açar. Daha sonra çözüm alanını oluşturan hücrelerin komşuluk ilişkilerini, ortak yüzeylerini ve alt ağlar arası sınır koşulu uygulanacak hücreleri belirler. Çözüm ağını kullanılacak işçi sayısına göre METIS (Serial Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering) yazılımını kullanarak eşit parçalara ayırır. Ayrılmış bir çözüm ağı örneği Şekil 4.11 'de verilmiştir. İşçiler arası iletişim PVM (Paralel Virtual Machine) paralel hesaplama rutinleri kullanılarak sağlanır. İşçilere ilgili çözüm ağı ve akış çözümü için gerekli diğer veriler (lokal ve global hücre bilgileri, komşuluk ilişkileri, sınır koşul uygulanacak elemanların bilgileri) gönderir. Zamana bağlı çözüm sürecindeki zaman adımlarında olabilecek çeşitli hata bilgileri veya başarılı işlem sonuçları için işçilerden gelen bilgileri bekler.

WRF çözümlerinden elde edilen zamana bağlı sınır koşullarının HYP3D akış çözümünde işçi işlemlere gönderilmesi için yönetici ve işçi modüllerinde tasarlanan algoritmik değişiklik Tablo 1 'de gösterilmektedir. Zamana bağlı sınır koşulları yönetici işlemci tarafından gerekli çözüm adımlarında daha önceden hazırlanan veri dosyalarından okunmakta ve işçi işlemcilere gönderilmektedir. İşçi işlemciler de zaman adımları boyunca gönderilen verileri senkronize olarak almaktadırlar.

Bu çalışmada HYP3D akış çözücüsüne dışarıdan sağlanan zamana bağlı sınır koşulları ile paralel olarak çalışabilme kabiliyeti kazandırılmıştır.



Şekil 4.11 Ayrıklaştırılmış HYP3D çözüm alanı örneği (16 çekirdek)

Tablo 1 HYP3D yönetici ve işçi rutinleri

<u>YÖNETİCİ</u>	<u>İŞÇİ</u>
<pre> time=0. time_bcfar=dt_bcfar do i=1,npar call SENDWRFBC(bcfar) enddo DO ns = ns1,nslast do j=1,3 ressj(j,1) = 0. enddo do k=1,8 Coef(k) = 0. enddo dtmin = 10. If (mod(ns,100) .eq. 1) then do nr=1,npar call RECVQ(nr,np,isend,ilocal, q,qt) if(isend .gt. 10) then print*, 'Error partition:',np, isend call SHUTDOWN endif enddo CALL SENDDT Endif time=time+dtming IF (time .gt. time_bcfar) then CALL SENDWRFBC(bcfar) time_bcfar=time_bcfar+dt_bcfar ENDIF IF(mod(ns,nsres).eq.0.or.ns.eq.ns1.or.ns.eq. >nslast) then do nr=1,npar call RECVQ(nr,np,isend,ilocal,q,qt) if(isend .gt. 10) then print*, 'Error partition ',np , isend call SHUTDOWN endif enddo do j =1,3 ressj(j,1) = sqrt(ressj(j,1)/ncell) if(ressj(j,2).eq. 0.) ressj(j,2) = ressj(j,1) if(ressj(j,1).ne. 0.) ressj(j,1) = >ALOG10(ressj(j,1)/ressj(j,2)) enddo write(*, '(' LogRes-Cd-C1 : ',i6,2x,f6.3, >1x,f6.3,4x,3E11.3)') >ns,ress(1,1),ress(2,1),Coef(1),Coef(2) write(21,'(i6,2x,3e12.4)') >ns,(ress(j,1),j=1,2) write(22,'(i6,2x,8e12.4)') ns,(Coef(k),k=1,8) if(MAX(ress(1,1),ress(2,1)) .gt. 2.) then print*, ' Residuals hit the roof...' call SHUTDOWN endif ENDIF ENDDO ... </pre>	<pre> time=0. time_bcfar=dt_bcfar call RECVWRFBC(bcfar) DO ns = ns1,nslast if (ns .eq. ns1)then do j=1,5 do k=1,ncbc bcfar(2,j,k)=bcfar(1,j,k) enddo enddo endif do i=1,3 ressi(i) = 0. enddo if (mod(ns,100).eq.1) call >CALDT(q,press,dxmin,dt) time=time+dtming IF (time .gt. time_bcfar) then call RECVWRFBC(bcfar) print*, 'Calling WRFBC',time,time_bcfar time_bcfar=time_bcfar+dt_bcfar ENDIF call RK3(tids,ilocal,libc,ibcs,ibcps,ibcrec, >neigh,ntype,q,press,dq,qn,flux,vgrad,qt,tnu, >dt,wdist,area,volume,cosn,cost) if(mod(ns,nsres) .eq. 0 .or. ns .eq. ns1 >.or. ns .eq. nslast) then do n=1,ncell ressn(1) = ressn(1) + dq(1,n)**2 + >dq(2,n)**2 + dq(3,n)**2 + dq(4,n)**2+ >dq(5,n)**2 enddo if(ns .ne. nslast) call SENDQ(2,q,qt) endif ENDDO call SENDQ(3,q,qt) call PVMFEXIT(info) stop end... </pre>

4.3.2.3 Spalart Allmaras Türbülans Modeli

Spalart-Allmaras (SA) türbülans modelinin HYP3D akış çözücüsüne adaptasyonu ve düz levha (flat plate) üzerindeki akışlarda doğrulanması bu çalışmada tamamlanmış, ve WRF ile akuple edilmiş HYP3D çözümlerinde kullanılmıştır. Ancak gözlem verisine dayalı atmosferik sınır tabaka profilleri için doğrulama çalışması yapılamamıştır. Bu çalışmada kullanılan ve akuple çözümlerin kıyaslandığı ölçüm istasyonu (met mast) gözlem verisi yerden 71.4m yükseklikte ve tek bir noktada alınmıştır. Ayrıca uygulanan temel SA modelinde duvar fonksiyonu kullanılmamaktadır. Bu durumda türbülanslı akışlarda laminar alt tabakanın çözümlenebilmesi için yüzeye dik yöndeki çözüm ağı çözünürlüğünün oldukça yüksek olması gerekir. Çok yüksek çözünürlüklü sınır tabaka çözüm ağlarında en küçük hücre boyutu da küçüldüğü için bu çalışmada kullanılan açık şemalı RK3 zaman entegrasyonunda CFL (Courant–Friedrichs–Lewy condition) sınırlamasından dolayı zaman adımı çok küçülmektedir ve uzun süreli (aylık, yıllık) rüzgar alanlarının hesaplanması mümkün olmamaktadır.

SA türbülans modelinde yüzey pürüzlülüğünü içeren değişiklikler önerilmiştir (Aupoix ve Spalart, 2003; Blocken ve Stathopoulos, 2007). Ancak önerilen bu değişikliklerde duvar fonksiyonu veya yüksek çözünürlüklü sınır tabaka çözüm ağı kullanılmasını gerektirmektedir.

Projenin son döneminde yüksek çözünürlüklü sınır tabaka çözüm ağları ile daha büyük zaman adımlarında zaman entegrasyonunun yapılabilmesi amacıyla nokta/hücre kapalı (point/cell implicit) simetrik Gauss-Seidel çözüm algoritması geliştirilmiştir.

4.3.2.4 Nokta/Hücre Kapalı Simetrik Gauss-Seidel (SGS) Çözüm Yöntemi

HYP3D'de zaman entegrasyonu 3. dereceden Runge-Kutta (RK3) yöntemiyle yapılmaktadır. RK3 açık şemalı bir Euler (forward Euler) yöntemidir:

4.3.2.1 bölümünde verilen korunum denklemlerinde akı terimleri sol tarafa alınır ve R olarak tanımlanırsa

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \vec{Q} d\Omega = - \oint_S (\vec{F}_c - \vec{F}_v) dS = R$$

Akış değişkenlerinin sabit olduğu bir hücre için korunum denklemi

$$\Omega \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} = R$$

olarak yazılabilir. Zamanda ayırıklaştırma ileri (forward) Euler denklemi ile ifade edilir

$$\Omega \frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t} = R^n$$

Burada n zaman adımı indeksidir. Sonrasında tek bilinmeyenli Euler açık çözüm yöntemi elde edilir:

$$Q^{n+1} = Q^n + \frac{\Delta t}{\Omega} R^n$$

Üçüncü dereceden hassas Runge-Kutta çözüm yönteminde ise sonlu hacimler yöntemiyle ayırıklaştırılmış sağ taraftaki akı terimleri önce zaman adımı 'n'de ardından da bir önceki iterasyon seviyesi 'k' da hâlihazırda bilinen akış değişkenleri ile hesaplanır: 3 adımlı RK3 yönteminde de her hücredeki akış değişkenleri açık bir ifade ile kolaylıkla hesaplanabilir:

$$Q^{n+1,k+1} = Q^{n,k} + \frac{\Delta t}{\Omega} R^{n+1,k} \quad k = 0,1,2$$

$$R^{n+1,0} = R^n$$

$$Q^{n+1,0} = Q^n$$

Ancak açık şemalı RK3 yönteminde stabil bir çözüm için zaman adımı sınırlaması vardır (CFL<2)

Projenin son döneminde zamana bağlı çözümlerde zaman adımını büyütme amacıyla SGS yöntemi geliştirilmiştir. SGS kapalı (implicit) çözüm şemasında sağ taraftaki akı terimleri “n+1” zaman adımında hesaplanır:

$$\Omega \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} = R^{n+1}$$

$$\Omega \frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t} = \frac{\Omega}{\Delta t} \Delta \vec{Q} = R^{n+1}$$

Sağ taraftaki R^{n+1} terimi 1. Derece Taylor serisi açılımıyla n zaman adımında ifade edilebilir:

$$R^{n+1} = R^n + \left(\frac{\partial R}{\partial \vec{Q}} \right)^n \Delta \vec{Q}$$

Burada $\frac{\partial R}{\partial \vec{Q}}$ akı Jakobiyanı olarak bilinir ve bu çalışmada sonlu farklar yöntemiyle nümerik olarak hesaplanmıştır. Ayrıklaşmış denklem son haliyle:

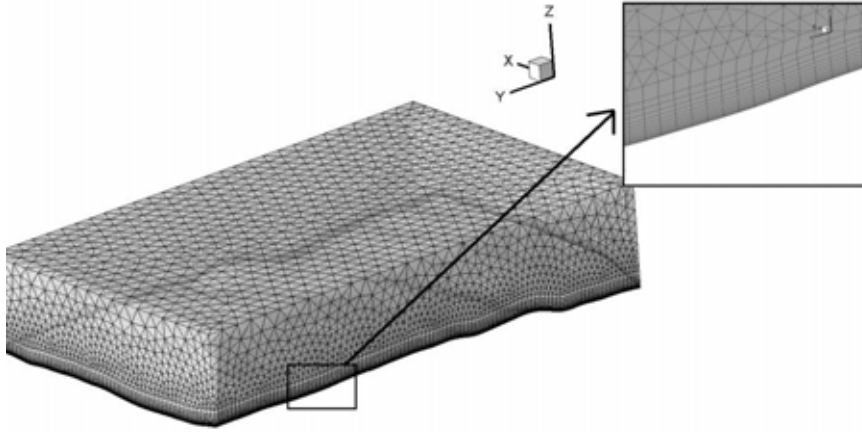
$$\Omega \frac{\Delta \vec{Q}}{\Delta t} - \frac{\partial R}{\partial \vec{Q}} \Delta \vec{Q} = R^n$$

$$\left(\frac{\Omega}{\Delta t} - \frac{\partial R}{\partial \vec{Q}} \right) \Delta \vec{Q} = R^n$$

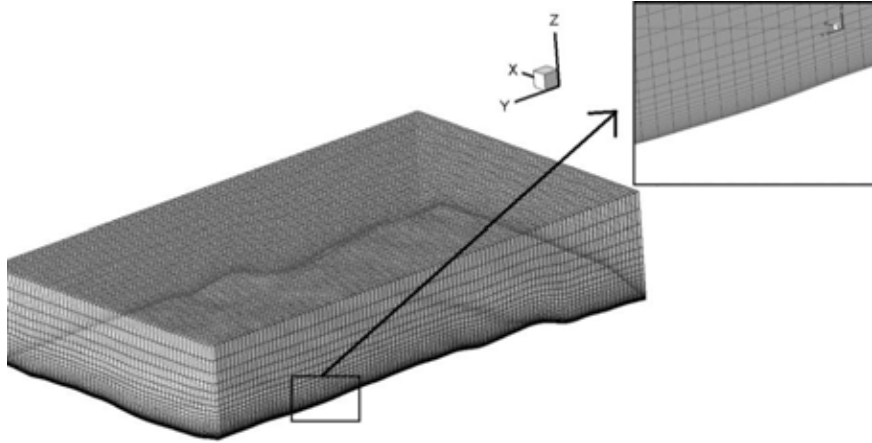
Yukarıdaki verilen lineer denklem sistemin çözümü, SGS yöntemi ile sol taraftaki global yük matrisinin sadece alt veya üst diyagonal terimlerinin alternatif bir şekilde kullanılmasıyla iteratif olarak elde edilir.

4.3.2.5 HYP3D İçin Çözüm Ağı Üretilmesi

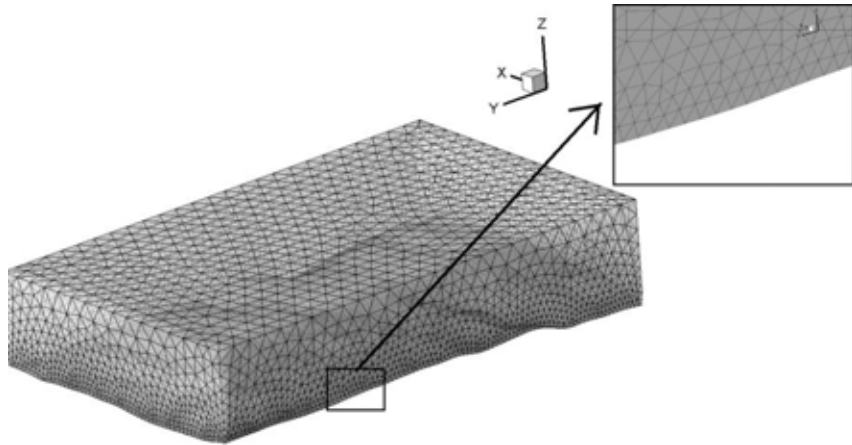
Bu çalışmada atmosferik akış çözümleri gözlem verilerinin sağlandığı Mersin Mut bölgesi için yapılmıştır. Mut bölgesinin yüksek çözünürlüklü topoğrafya bilgisi ASTER GDEM Worldwide Elevation Data Sunucusundan ücretsiz temin edilmiş olup, 1.5 arc-sec (~ 30 m.) çözünürlüğe sahiptir. Bu yükseklik bilgileri ile lisanslı GAMBIT yazılımı kullanılarak yüzey çözüm ağı oluşturulmuş, ardından yeryüzünden yaklaşık 1 km yükseklikteki bir hacim için 3 boyutlu çözüm ağı yaratılmıştır. Farklı çözünürlüklerde yapılı, yapısız ve hibrit çözüm ağları yaratılarak hassasiyet ve performans değerlendirmesi yapılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.14 HYP3D için hibrit çözüm ağı örneği



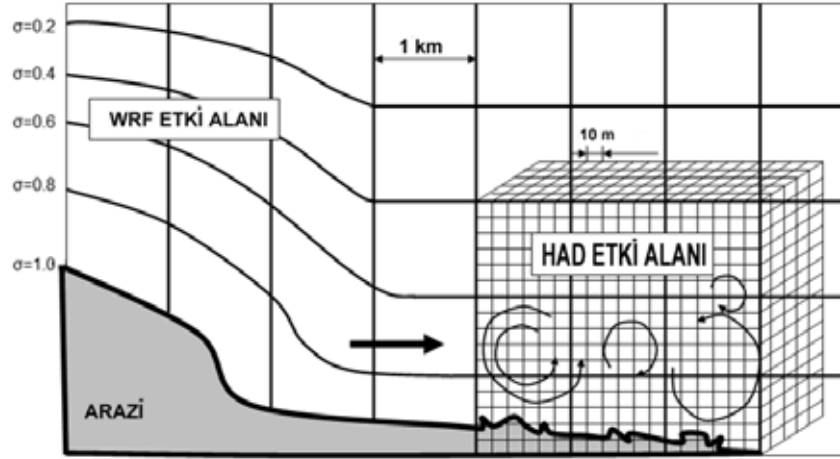
Şekil 4.13 HYP3D için yapılı çözüm ağı örneği



Şekil 4.12 HYP3D için yapısız çözüm ağı örneği

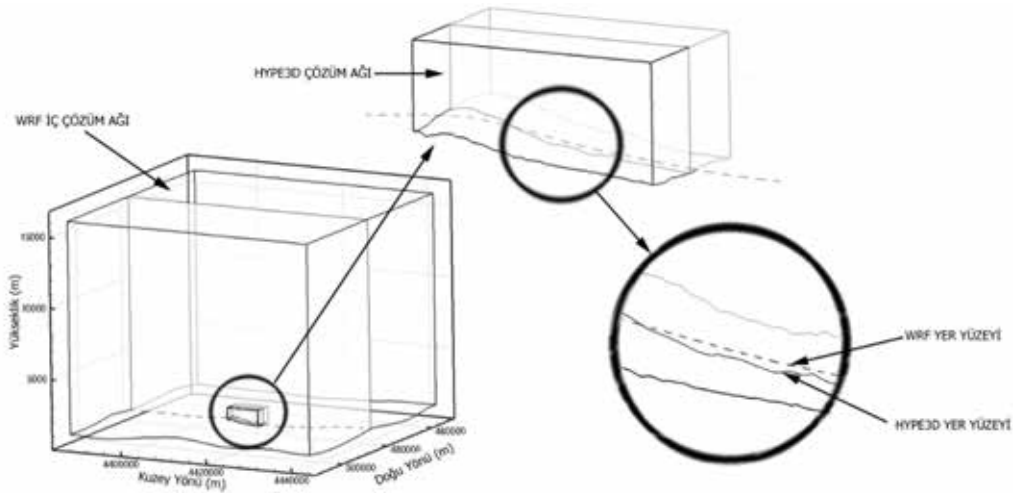
4.3.3 WRF ve HYP3D Akış Çözücülerinin Akuple Çalışması (Coupling)

Bu çalışmada, seçilen bölge için düşük çözünürlüklü WRF hava tahmin modeli ile hesaplanan zamana bağlı rüzgar akış alanları yüksek çözünürlüklü HYP3D Navier-Stokes çözücü için sınır koşulları olarak kullanılmış; böylece WRF ve HYP3D akış çözücülerini akuple olarak çalıştırılmış, yüksek çözünürlüklü atmosferik akış alanları elde edilmiştir. Bu yöntemin ana hatları Şekil 4.15’de gösterilmektedir.



Şekil 4.15 WRF ile HAD çözücüsü HYP3D’nin etkileşimli çalıştırılması

WRF ve HYP3D çözüm ağlarındaki uzaysal çözünürlüklerin farklı olması (WRF~1 km, HYP3D~30m) yere yakın çözüm ağı noktalarında interpolasyon yapılabilmesi için bazı nümerik yaklaşımların (approximation) yapılmasını zorunlu kılmıştır.



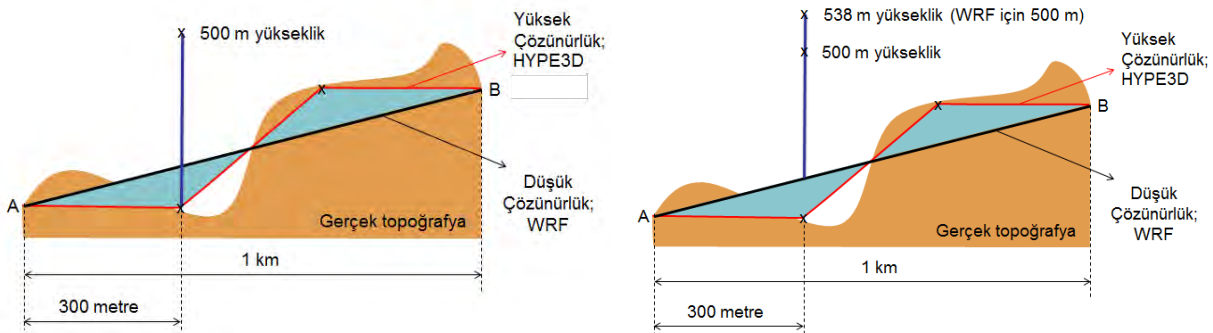
Şekil 4.16 HYP3D ile WRF çözüm ağlarındaki yer yüzeyleri farkı

Yukarıdaki resimde görüldüğü gibi yüksek çözünürlüklü HYP3D çözüm ağında tanımlı ancak düşük çözünürlüklü WRF çözüm ağında tanımlı olmayan bazı alanlar ve bu alanlara düşen düğüm noktaları bulunmaktadır. Bu düğüm noktaları çok sayıda olmamakla birlikte, bu bölgelerde interpolasyon yapılamaması ve rüzgar hızının sıfır olduğu kabulü akış çözümlerinde nümerik hatayı artırmaktadır. Bu sebeple WRF çözüm ağında tanımsız olan HYP3D sınır noktalarında akış değişkenlerinin yeniden tanımlanabilmesi amacıyla yerel esnetme (local stretching) ve kaydırma (shifting) gibi bazı yaklaşımlar değerlendirilmiştir.

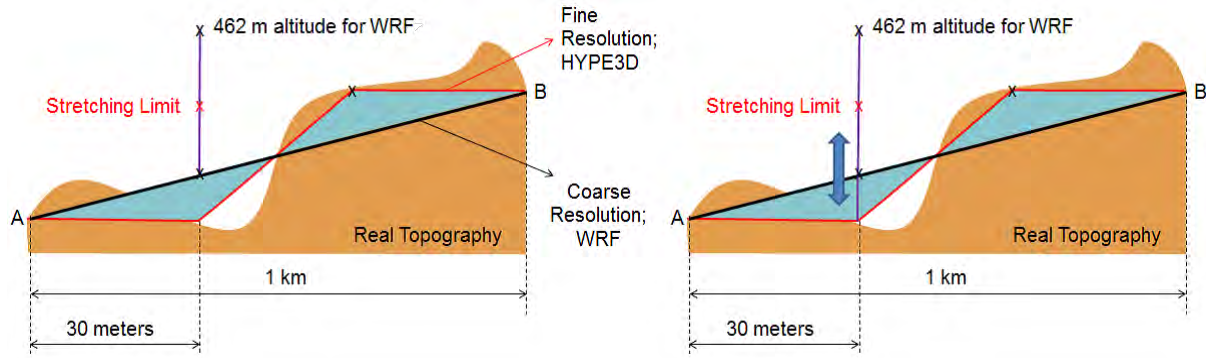
Aşağıdaki sembolik resimde gerçek topoğrafya yüksek (kırmızı) ve düşük (siyah) olmak üzere iki farklı çözünürlükte ifade edilmiştir. Yukarıda bahsedilen tanımsız bölgeler ise açık mavi renkle gösterilmektedir.

Kaydırma yönteminde sınır koşullarına karşılık gelen - enlemsel ve boylamsal düzlemdeki iki boyutlu - kesitler üzerindeki tüm noktalar bu iki çözünürlük farkından kaynaklanan boşluk kadar aşağı/yukarı kaydırılarak interpolate edilmiştir.

Yerel esnetme yönteminde ise, yüzeye yakın WRF çözüm alanı HYP3D alanı ile örtüşecek bir şekilde ve yerden yüksekliği sınırlı bir bölgede yerel olarak esnetilmiş ve interpolasyon bu işlem sonrasında yapılmıştır. Bu yöntem, WRF çözüm alanında ilk 200 metrelik dikey uzaklık içerisinde kalan düğüm noktalarının, WRF ile HYP3D 'nin yer sınırları çakışacak şekilde esnetilmesi ile gerçekleştirilir. WRF çözümünden HYP3D sınır koşulları için elde edilen akış değişkenleri ilk 200 metrelik dikey uzaklığın dışında ise çözüm ağında yapılan esnetmeden etkilenmemiştir. Bu iki yaklaşımın temel farkları Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 'de verilmektedir.



Şekil 4.17 WRF' de tanımsız alanlar için akış değişkenlerinin tanımlanması (kaydırma yöntemi)

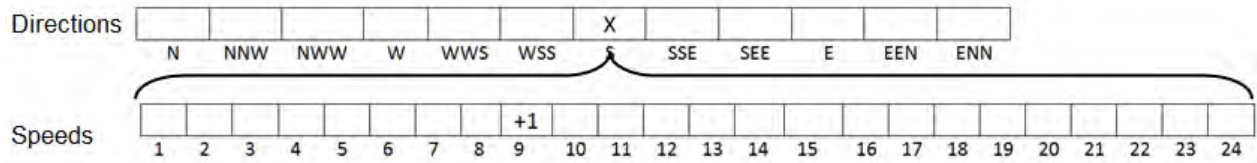


Şekil 4.18 WRF’ de tanımsız alanlar için akış değişkenlerinin tanımlanması (yerel esnetme yöntemi)

4.3.4 Rüzgar Güç Potansiyeli Değerlendirmesi

Rüzgar potansiyelinin değerlendirilmesi ve bölgenin istatistiksel analizi için özel çıktı ve veri toplama rutinleri HYP3D ye eklenmiştir.

Zaman serisi analizleri için, akış verilerinin simulasyon sırasında yazdırılmıştır. Ayrıca, bütün çözüm alanının istatistiksel analizleri için her noktada bu veriler sınıflandırılmıştır. Örnek olarak bir noktada rüzgar hızı ve yönü sırasıyla 9 m/s ve Güney olduğunda Şekil 4.19’te görüldüğü gibi sınıflandırılmaktadır.



Şekil 4.19 Rüzgar yön ve hızının simulasyon sırasında sınıflandırılması

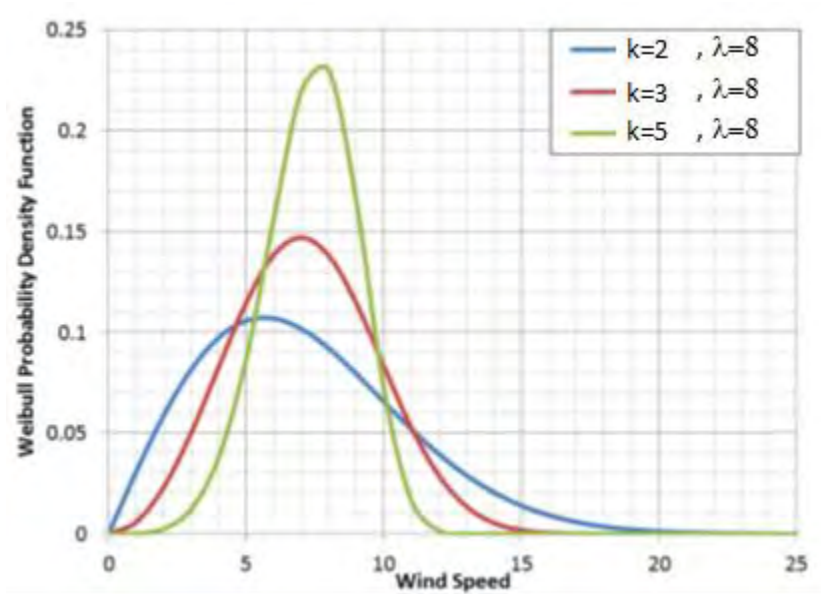
360 derecenin 12 ayrı bölüme bölünmesi ile oluşan yön ve 24 ayrı rüzgar hızı için gerçekleşme frekansı simulasyon sırasında hesaplanan rüzgar yön ve hızına göre her düğüm noktasında toplanmıştır. Simulasyonun sonunda ve daha önceden belirlenmiş kontrol zamanlarında kategorize edilmiş rüzgar hız ve yönleri yazdırılmış ve rüzgar potansiyelinin belirlenmesi için istatistiksel analizler yapılmıştır.

Çalışmada istenilen bölge için istatistik hesaplarında sıkça kullanılan Weibull olasılık dağılımları elde edilmiştir. Bu dağılımlar belli rüzgar hızlarının görülme olasılığını (sıklığını) göstermekte olup, rüzgar potansiyeli belirleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

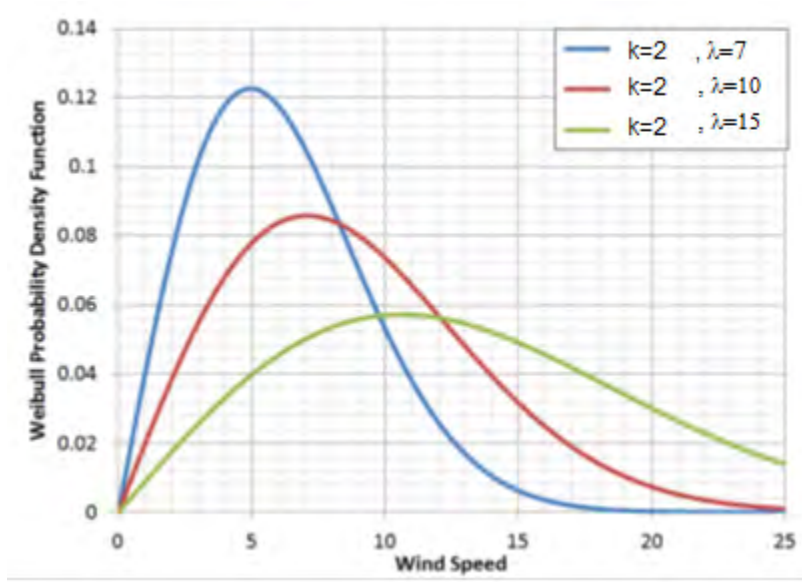
Weibull dağılımı:

$$f(v, \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k}$$

Burada λ ölçek Katsayısı, k şekil katsayısı ve v ise rüzgar hızıdır. Ölçek Katsayısı, görülmesi en yüksek olasılığa sahip rüzgar hızı, şekil katsayısı ise bu dağılımın şekli ile ilgilidir. k 'nın küçük olduğu durumlarda dağınık bir dağılım gözlemlenirken, k 'nın yüksek olduğu durumlarda λ etrafında toplanmış bir dağılım gözlenir. Şekil 4.20'de aynı ölçek katsayısına sahip farklı şekil katsayısındaki dağılımlar gösterilirken; Şekil 4.21'de aynı şekil katsayısına sahip farklı ölçek katsayısındaki dağılımlar gösterilmiştir.

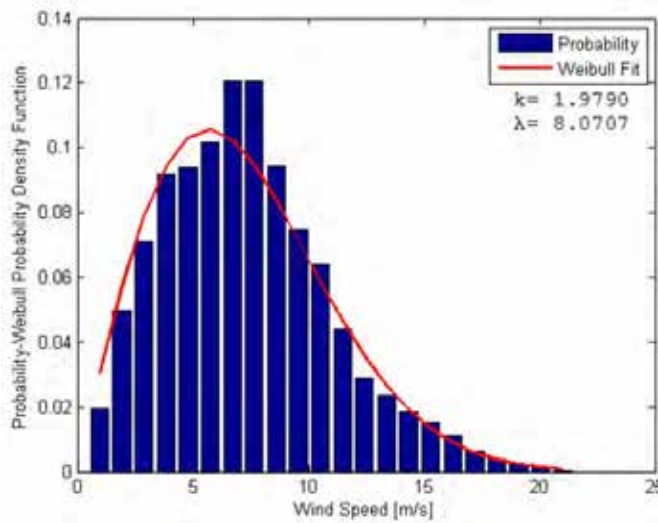


Şekil 4.20 Ölçek katsayısının etkisi

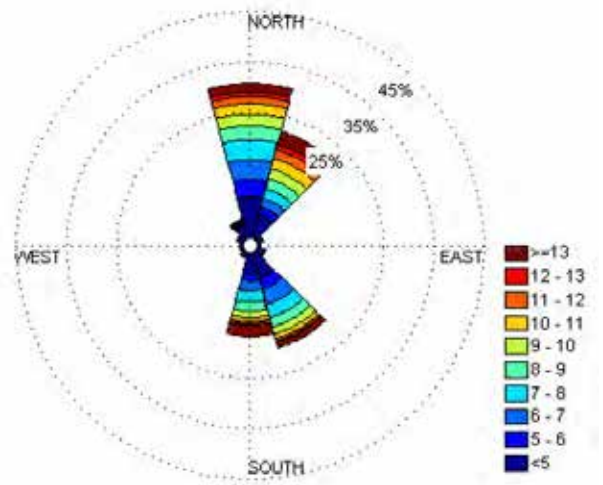


Şekil 4.21 Şekil katsayısının etkisi

Şekil 4.22 'de bir rüzgar olasılık dağılımı örneği gösterilmiştir. Bu rüzgar olasılık dağılımı kırmızı eğri ile gösterilen Weibull dağılımına uydurulur (Curve-fit). İlk mavi çubuk rüzgarın 1 m/s hızla esme olasılığı olan %2 'yi göstermektedir. Şekil 4.23 'de gösterilen rüzgar gülü grafiklerinde ise radyal koordinat, rüzgar hızlarının görülme sıklığını, açısal koordinat rüzgarın yönünü, renkler ise rüzgar hızının büyüklüğünü göstermektedir.



Şekil 4.22 Weibull dağılımı



Şekil 4.23 Rüzgar gülü

Rüzgar güç yoğunluğu (power density) ise basitçe birim alandan elde edilebilecek rüzgar gücüdür ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\text{Güç yoğunluğu} = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

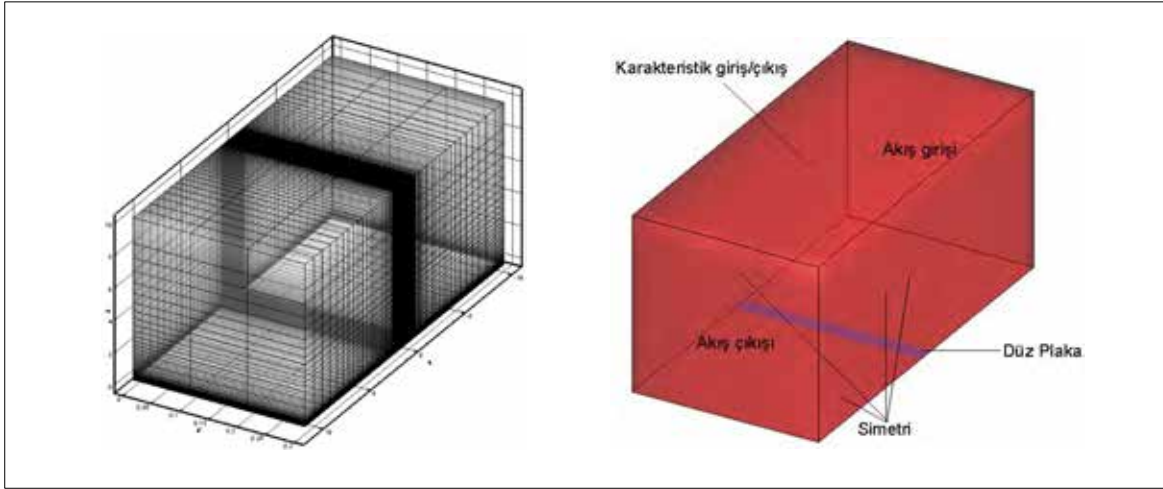
Yıllık ortalama rüzgar potansiyeli yoğunluğunun hesaplanması için 1 saatlik aralıklarla alınan rüzgar hızı verilerinin integrali alınmış ve simulasyon süresine (1 yıl) bölünmüştür. Bu veriler istenilen yükseklikte yaratılan topoğrafyayı takip eden yüzeyler üzerindeki bütün düğüm noktalarında toplanmış ve bu şekilde rüzgar potansiyel yoğunluğu dağılım grafikleri elde edilmiştir.

4.4 Bulgular ve Yorumlar

Bu çalışmada öncelikle HYP3D ile düz levha üzerindeki laminar ve türbülanslı sınır tabaka akışının doğrulanması yapıldı. Ardından WRF 'dan alınan zamana bağlı sınır koşulları ile kısa dönemli atmosferik akış çözümleri yapılarak elde edilen çözümler WRF çözümleri ile karşılaştırılarak doğrulandı, kullanılan interpolasyon yöntemleri ve çözüm ağları değerlendirildi, çözüm ağından bağımsız çözümler elde edildi. Paralel hesaplamaların ve son dönemde geliştirilen SGS çözüm yönteminin verimliliği incelendi. Son olarak 2010 yılı için uzun dönemli çözümler elde edilerek Mersin-Mut bölgesinin rüzgar enerji potansiyeli ve yıllık enerji üretim tahmin çalışmaları yapıldı.

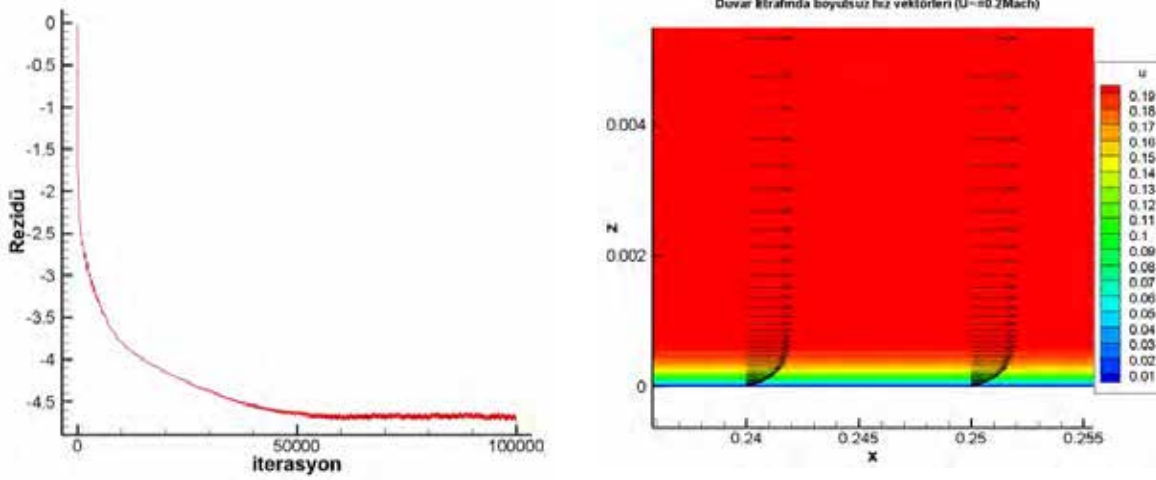
4.4.1 HYP3D'nin Laminar Ve Türbülanslı Akışlar İçin Doğrulanması

94736 düğüm noktası ve 70110 hücreden oluşan yapı bir çözüm ağında (Şekil 4.24) $Re=5000$ ve $1 * 10^6$ için laminar ve türbülanslı akış hesaplamaları yapılmıştır. Çözüm ağı düz levha boyunca ve levha yüzeyine dik yönde yoğunlaştırılmıştır. Çözüm ağı ve sınır şartları Şekil 4.24'de verilmiştir.

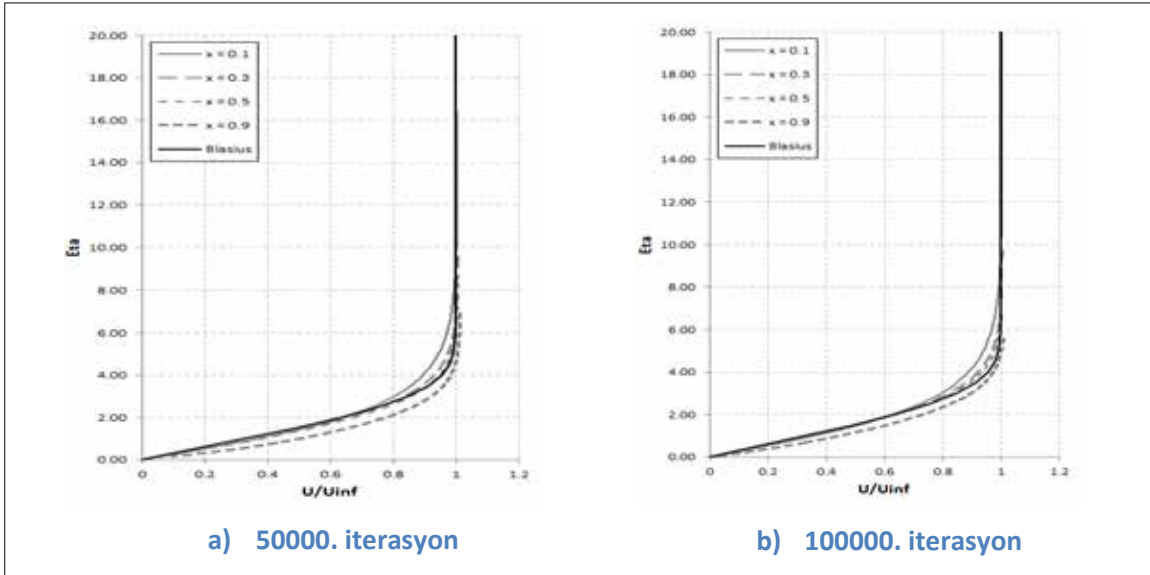


Şekil 4.24 HYP3D akış çözücüsünde kullanılan çözüm ağı ve sınır koşulları

Laminar hesaplama zaman adımlarında elde edilen çözüm kalıntısı (residual) değerleri (Log skalasında) ve düz plaka boyunca farklı noktalarda yüzeye dik yöndeki hız dağılımı Şekil 4.25 'de gösterilmektedir. Kalıntı grafiğinde 50000. zaman adımının ardından kalıntının $10^{4.5}$ kat düştüğü ve çözümün yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 4.25 Çözümün kalıntı grafiği ve yüzeye dik yöndeki hız dağılımı

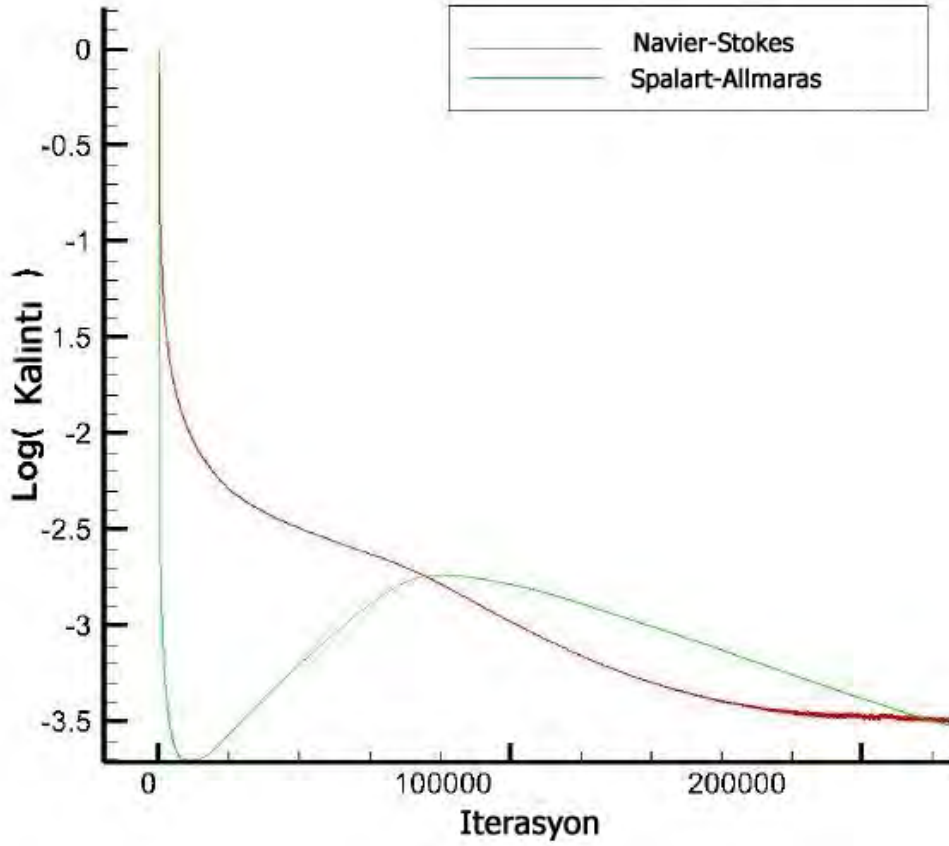


Şekil 4.26 Farklı iterasyonlarda elde edilen sonuçların Blasius hız profili ile karşılaştırılması

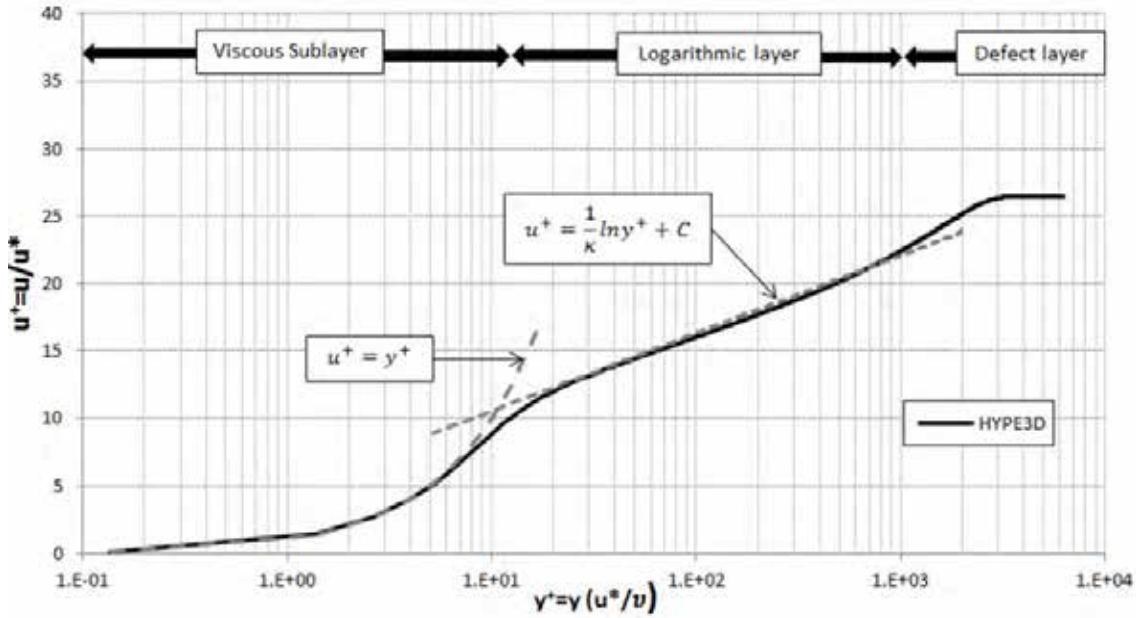
Levha boyunca farklı x lokasyonlarındaki hız profilleri sınır tabaka denklemlerinin analitik çözümüne dayalı ideal Blasius hız profili ile η koordinatında $\eta = \left(\frac{U}{2\nu x}\right)^{1/2} y$ karşılaştırılmıştır (Şekil 4.26). Beklenildiği gibi boyutsuz hız profili Blasius profili ile uyumludur. Levha başlangıcında ve bitiminde görülen fark nümerik çözümde ideal şartlardan uzaklaşılmasıyla açıklanabilir.

Türbülanslı çözüm için kalıntılardaki yakınsama Şekil 4.27 'da görünmektedir. Yüzeye dik yöndeki hız profilinin boyutsuz U^+ ve y^+ koordinatlarında değişimi ve bu değişimin teorik “duvar kanunu” (law of the wall) ile karşılaştırılması Şekil 4.28 'de verilmiştir.

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi HYP3D de uygulanan Spalart-Allmaras türbülans modeli “duvar kanunu ”nu başarılı bir şekilde çözümleyebilmektedir.



Şekil 4.27 Spalart-Allmaras türbülans modeli kalıntı yakınsaması



Şekil 4.28 Spalart-Allmaras modeli ile elde edilen düz plaka üzerinde türbülanslı sınır tabaka profili

4.4.2 HYP3D-WRF Akuple Çözüm Yönteminin Doğrulanması

HYP3D'nin WRF ile akuple edilmiş atmosferik akış çözümleri kurulu bir rüzgar çiftliğinin (wind farm) bulunduğu ve ölçüm istasyonu ile uzun süreli gözlem verilerinin toplandığı Mersin-Mut bölgesi için elde edilmiştir. WRF çözümünde içiçe geçmiş (nested) iki çözüm ağı kullanılmıştır (Şekil 4.3). Bu çözüm ağlarının yüzey çözünürlüğü yatay ekseninde dış çözüm ağında 3 km, rüzgar çiftliğini içeren iç çözüm ağında ise 1 km dir. HYP3D çözüm ağı için ASTER GDEM 'den elde edilen topografik yükseklik verileri kullanılmıştır . Bu veriler yüzeyde 30 metre yatay çözünürlüğe sahiptir.

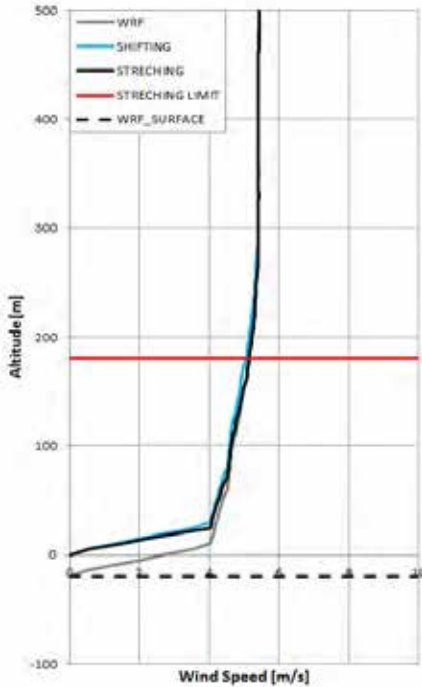
4.4.2.1 Veri İnterpolasyonunda Geliştirilen Yaklaşıklamaların Değerlendirilmesi

Bölüm 4.3.3 'te bahsedilen kaydırma ve local esnetme yaklaşıklamaları akuple çözümlere Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'de görülen olası durumlarda uygulanmıştır. İlk durumda, WRF yer sınırı HYP3D'nin sınırından alçakta, ikincisinde ise ise WRF yer sınırı HYP3D'den yüksektedir. Kaydırma yöntemiyle yapılan yaklaşıklamada nümerik yakınsama problemleri yaşanmış, ama lokal esnetme ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

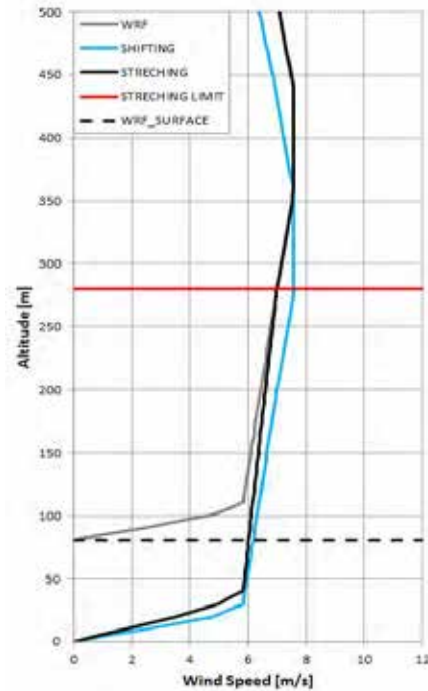
Esnetme limiti yerden yukarı 200 metre olarak seçilmiştir. Bu yöntemde çözüm ağı noktalarının esnetilmesi sadece yüzeye yakın dar bir düşümde yapılmakta ve diğer yüksekliklerde yapılan interpolasyon sonuçlarını etkilememektedir.

4.4.2.2 Mersin-Mut Bölgesi İçin Kısa Dönemli Çözümler

Akuple çözümlerin doğrulanması amacıyla öncelikle bir günlük bir zaman aralığında (04 Nisan 2010) WRF ile zamana bağlı çözüm elde edilmiştir. İç çözüm ağındaki WRF çözümleri 5dk'lık adımlarla çıktı dosyalarına yazdırılmıştır. WRF çıktı dosyalarında NetCDF (Network Common Data Form) formatındaki veriler işlenerek tekrar Fortran dilinde formatsız (unformatted) olarak veri dosyalarına yazdırılmıştır.



Şekil 4.30 WRF yer sınırının HYP3D yer sınırından alçakta olduğu durumda rüzgar hızı profilleri



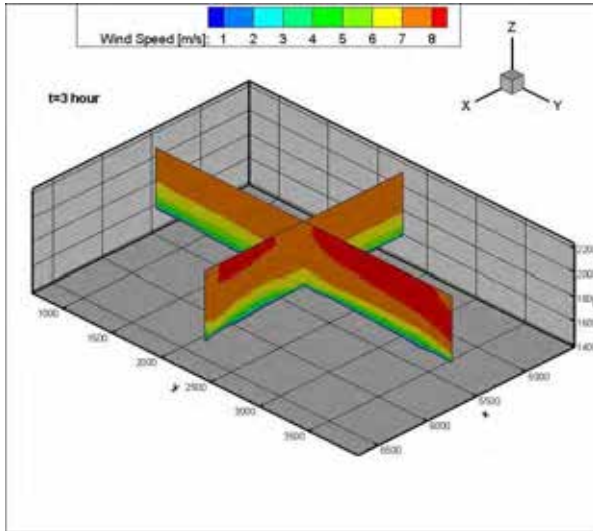
Şekil 4.29 WRF yer sınırının HYP3D yer sınırından yüksekte olduğu durumda rüzgar hızı profilleri

HYP3D çözümleri için Tablo 2 'de verilen yüzeye dik yönde farklı çözünürlükleri olan yapı, yapısız ve hibrit çözüm ağları oluşturulmuştur.

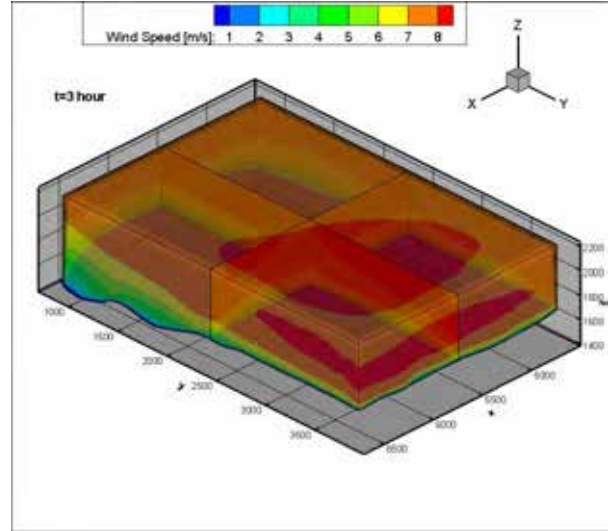
HYP3D çözüm alanının dikey sınırı yaklaşık 2000 metre yüksekliktedir. WRF çözümünden 5 dak. aralıklarla her HYP3D çözüm ağı için tüm gün sınır koşullarını içeren dosya setleri hazırlanmıştır. Bu çözüm ağlarında akuple atmosferik akış çözümleri 24 saatlik bir süre için başarıyla elde edilmiştir. Anlık dış sınır şartları ve çözüm alanındaki doğu-batı ve kuzey-güney yönünde alınan kesitlerdeki çözüm Şekil 4.32 'da verilmiştir.

Ölçüm istasyonunun bulunduğu, yerden 71.4m yükseklikte, çözüm ağlarının yaklaşık ortasında bulunan noktada elde edilen rüzgar hızı değerleri WRF tahminleri ve gözlem verileri ile karşılaştırılmıştır.

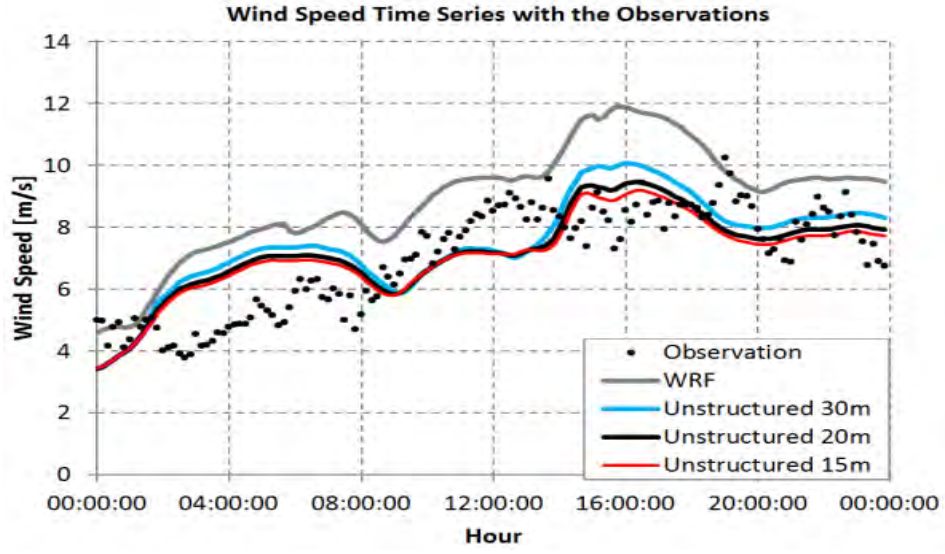
Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 'de görüldüğü gibi, HYP3D çözümleri gözlem verilerinden ve WRF tahmininden farklılık göstermesine rağmen tüm değerler arasında genel bir uyum gözlenmektedir.



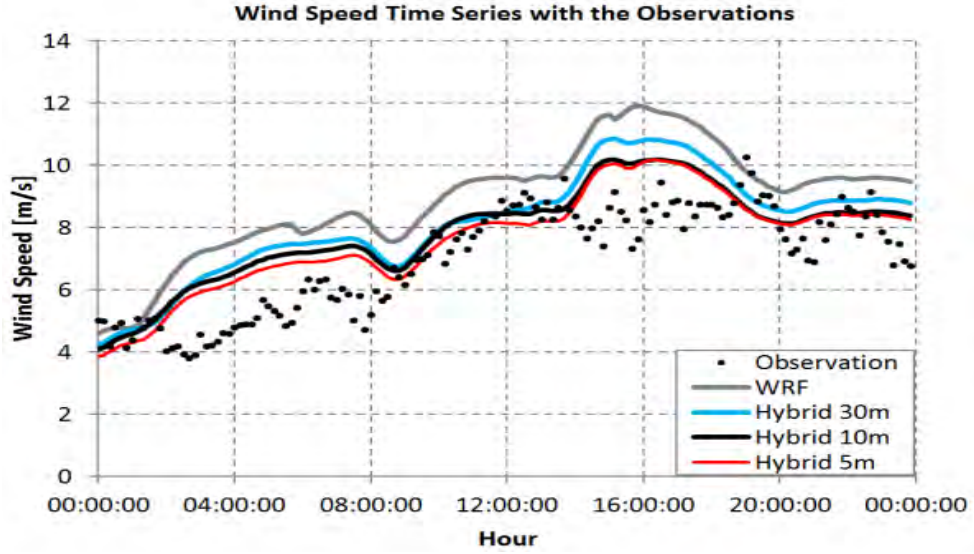
Şekil 4.32 Doğu-batı ve kuzey-güney yönünde alınan kesitlerdeki rüzgar hızı



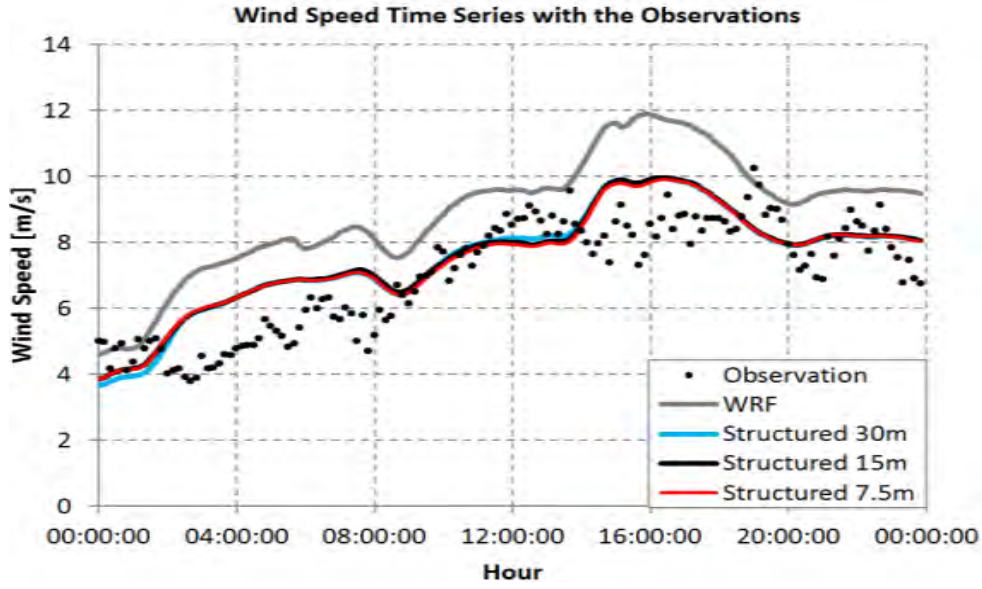
Şekil 4.31 Alınan kesitlerin çözüm alanıyla uyumu



Şekil 4.33 Yapısız çözüm ağlarıyla elde edilen HYP3D çözümlerinin WRF sonuçları ve gözlem verileriyle kıyaslanması



Şekil 4.34 Hibrit çözüm ağlarıyla elde edilen HYP3D çözümlerinin WRF sonuçları ve gözlem verileriyle kıyaslanması



Şekil 4.35 Yapılı çözüm ağlarıyla elde edilen HYP3D çözümlerinin WRF sonuçları ve gözlem verileriyle kıyaslanması

Farklı grid çözünürlükleri ile yapılan HYP3D tahminleri değerlendirebilmek için bir günlük gözlem verileri ile tahmin edilen değerler arasındaki karekök ortalama sapma (RMS) değerleri hesaplanmış ve bu değerler de Tablo 2 'de verilmiştir. HYP3D çözümlerinde sınır tabakasındaki çözüm ağı çözünürlüğü ve toplam hücre sayısı arttıkça, rüzgar hızı tahminlerinin gözlem verilerine yaklaştığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre 7.5 metre yüzey çözünürlüğüne sahip 97600 hücreli yapıli çözüm ağı bir günlük gözlem verileri ile en az sapmayı vermiştir. Tek bir gözlem noktasındaki değerlendirmenin yetersizliğinin farkında olarak bundan sonra yapılacak olan uzun dönemli atmosferik akış çözümlemelerinde bu çözüm ağı kullanılmıştır.

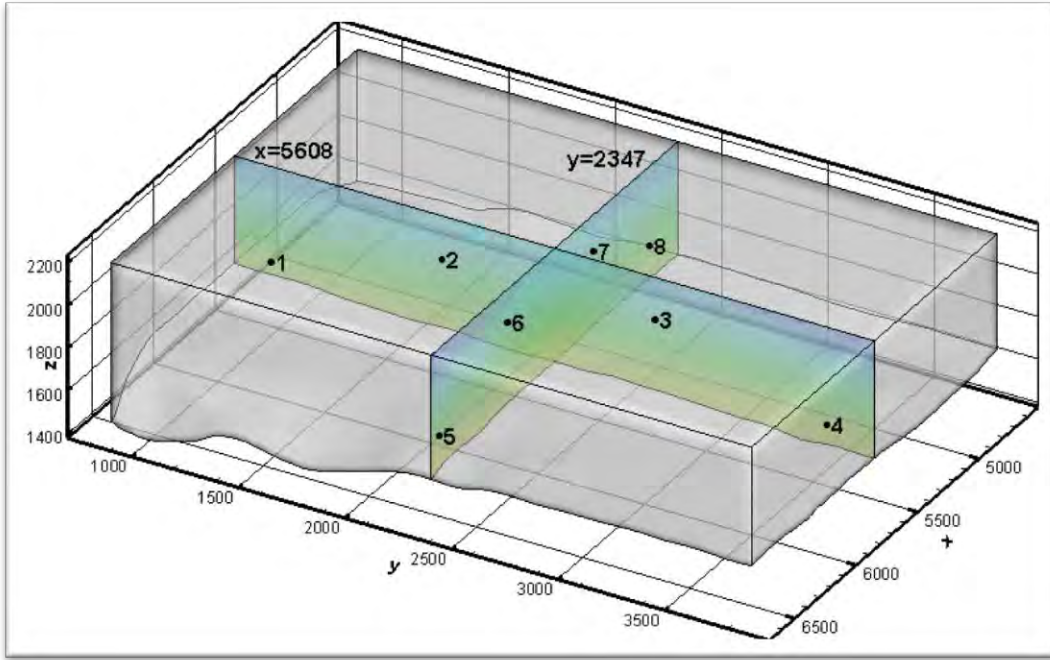
Tablo 2 Çözüm ağlarında elde edilen RMS sapma değerleri

Çözüm Ağı	Yüzeye dik yönde çözünürlük	Hücre sayısı	Ölçüm verisinden Sapma (RMS)
WRF	50 m	-	1.86
Yapılı	30 m	57267	1.12
Yapılı	15 m	79300	1.11
Yapılı	7.5 m	97600	1.10
Yapısız	30 m	599530	1.37
Yapısız	20 m	716475	1.20
Yapısız	15 m	886435	1.14
Hibrit	30 m	194048	1.52
Hibrit	10 m	200182	1.26
Hibrit	5 m	244884	1.13

4.4.3 WRF ve HYP3D Sonuçlarının Karşılaştırılması

HYP3D ile elde edilen akış çözümlerinden elde edilen rüzgar hızı dağılımları WRF çözümleri ile Şekil 4.36 'de görüldüğü gibi çözüm alanının doğu-batı ve kuzey-güney kesitlerinde ve bu kesitlerdeki farklı noktalarda 12 saatlik çözüm aralığında birbirleri ile karşılaştırılmış ve HYP3D çözümleri değerlendirilmiştir.

Şekil 4.38 ve Şekil 4.37 'da kuzey-güney ve doğu-batı kesitlerinde her iki çözümdeki mutlak hız farkının dağılımı verilmektedir. Her iki kesitte de iki çözüm arasındaki belirgin farklar yere yakın yüksekliklerde oluşmakta, yeryüzünden uzaklaştıkça HYP3D ve WRF tahminlerindeki farklılık belirgin bir şekilde azalmaktadır. Yeryüzü topoğrafyasını takip eden çözüm ağı yapısı ve yüksek topoğrafya çözünürlüklüğü HYP3D çözümleri yere yakın yüksekliklerde beklenildiği gibi WRF çözümlerinden farklılaşmaktadır.

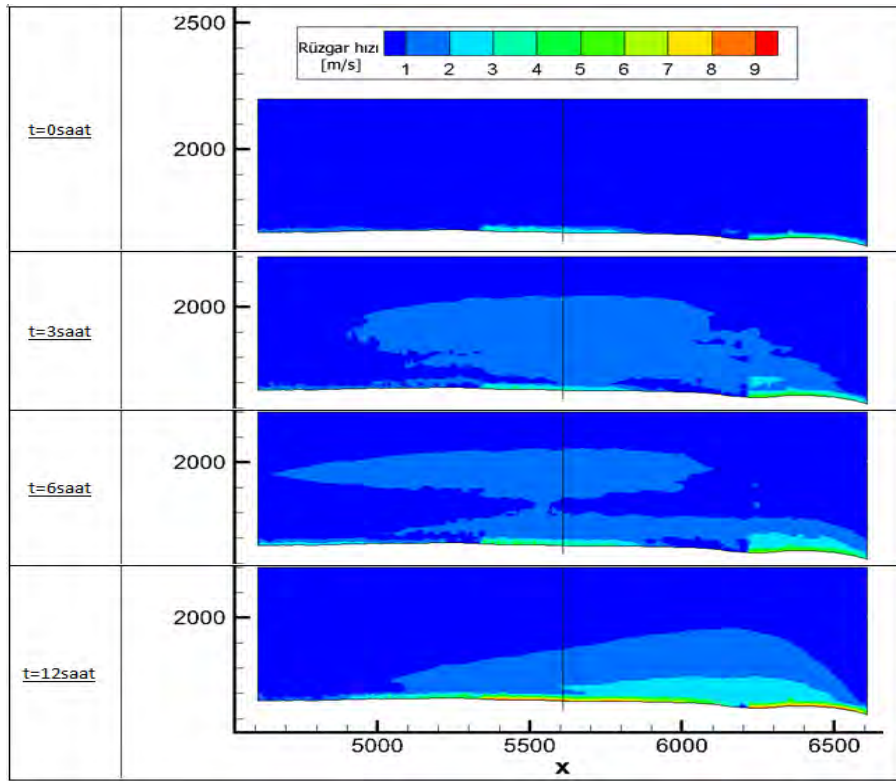


Şekil 4.36 Çözüm alanında kıyaslama yapılan noktalar

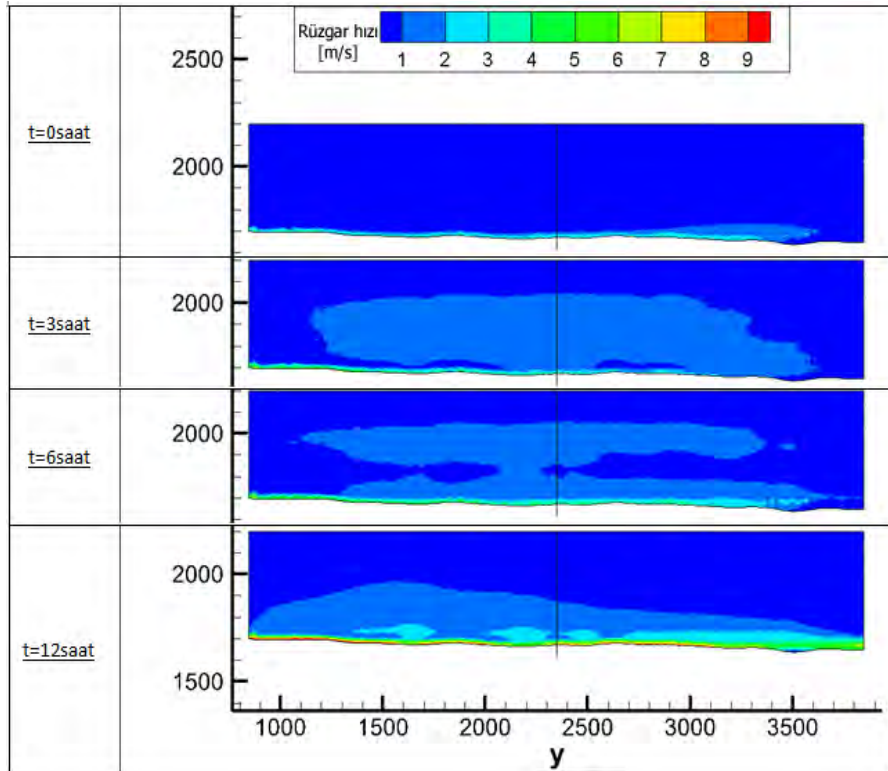
Şekil 4.39 ise Şekil 4.36 'de belirtilen 8 ayrı noktada HYP3D ve WRF ile elde edilen hız değerlerinin zamanda değişimi karşılaştırılmıştır. Yine beklenildiği gibi 1 ,4 ,5 ve 8 nolu yeryüzüne yakın olan noktalarda HYP3D çözümleri WRF çözümlerinden uzaklaşmakta, 2, 3, 6 ve 7 nolu yerden uzakta olan noktalarda ise HYP3D WRF tahminleri arasındaki fark azalmaktadır.

Bu bölümde elde edilen sonuçlara dayalı olarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

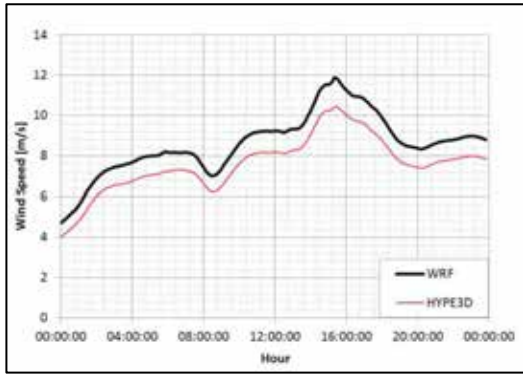
- HYP3D çözücüsü için zamana bağlı sınır koşulları WRF çözümlerinden interpolasyonla başarılı bir şekilde elde edilmiştir.
- WRF çözümlerinden elde edilen sınır koşulları HYP3D akış çözücüsünün paralel hesaplama ortamında başarıyla uygulanmıştır.
- Düşük çözünürlüklü WRF ile yüksek çözünürlüklü HYP3D çözüm alanlarının arasında kalan tanımsız bölgelerde uygulanan nokta kaydırma yöntemi olası nümerik sorunların oluşması önlenmiştir.
- Düşük çözünürlüklü, kartezyen çözüm ağırları üzerinde elde edilen WRF çözümleri ile akuple edilen, yüksek çözünürlüklü zamana bağlı atmosferik rüzgar alanları HYP3D ile başarıyla hesaplanmıştır.
- HYP3D ile elde edilen zamana bağlı çözümler tek noktadaki gözlem verisi ve WRF çözümleri ile kıyaslanarak kısmen doğrulanmıştır. Ancak HYP3D çözümlerinin WRF çözümlerine kıyasla gözlem verilerine daha yakın olduğunun kabul edilebilmesi için daha detaylı gözlem verilerine gereksinim vardır.



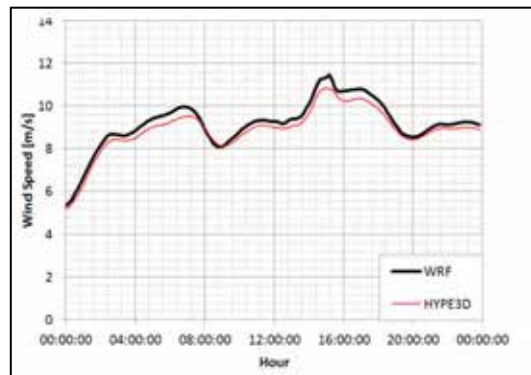
Şekil 4.38 Kuzey-güney kesiti boyunca WRF-HYP3D çözümleri arasındaki rüzgar hızı farkı



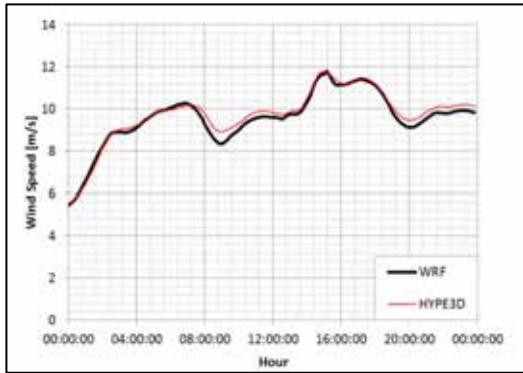
Şekil 4.37 Doğu-batı kesiti boyunca WRF-HYP3D çözümleri arasındaki rüzgar hızı farkı



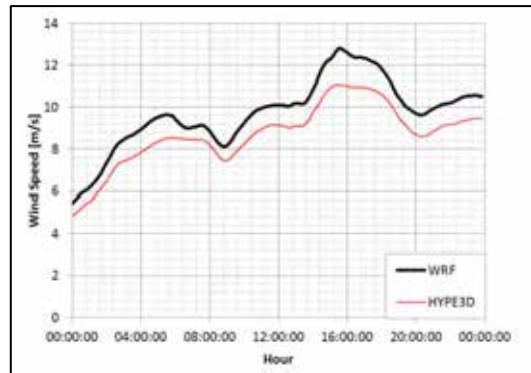
Nokta 1



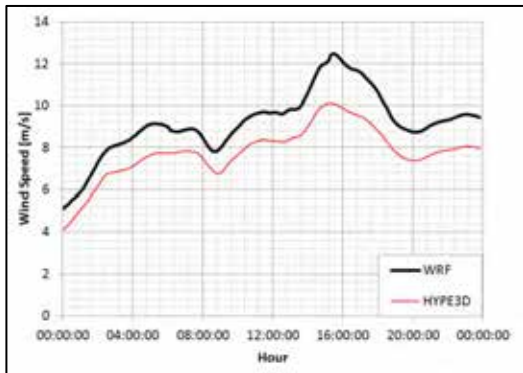
Nokta 2



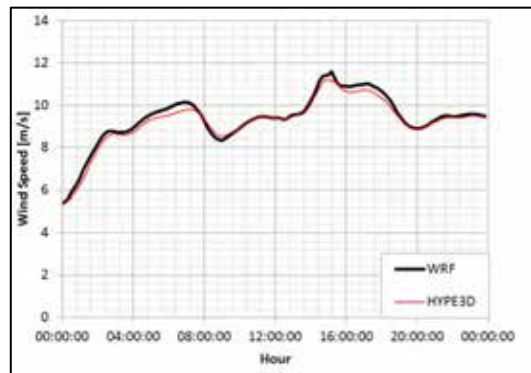
Nokta 3



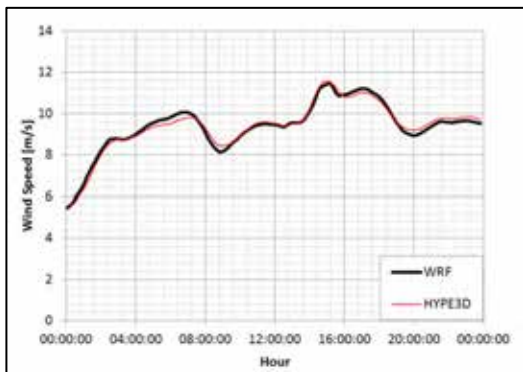
Nokta 4



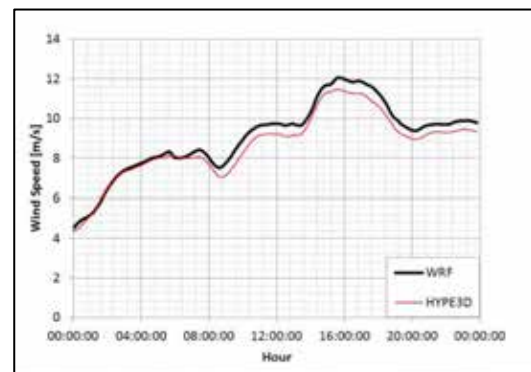
Nokta 5



Nokta 6



Nokta 7

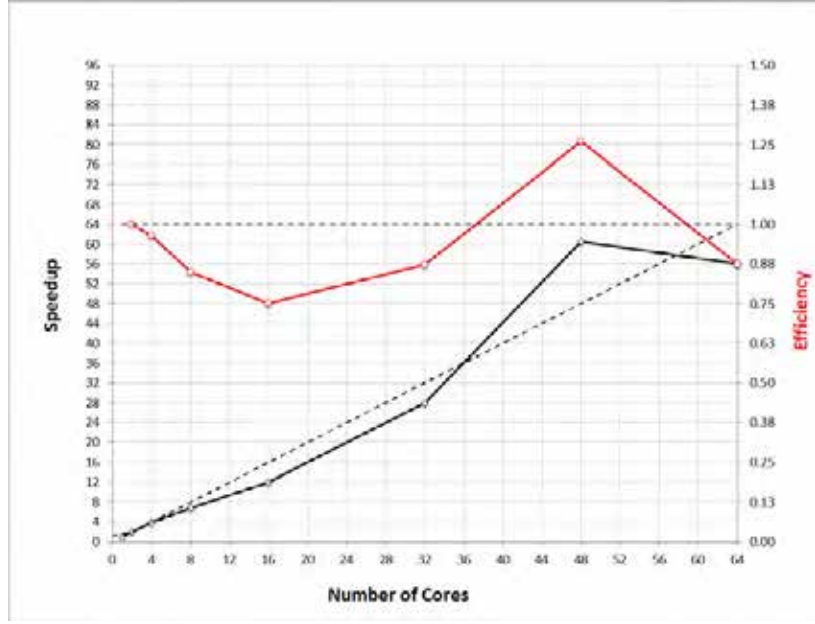


Nokta 8

Şekil 4.39 WRF ve HYP3D sonuçlarının 8 farklı noktada rüzgar hızı dağılım grafikleri

4.4.4 Paralel İşlem Verimliliği

WRF ile akupile edilmiş HYP3D akış çözücüsü ile bir önceki bölümde sunulan 24 saatlik atmosferik akış çözümleri 2-64 arasında değişen sayıda çekirdek (core) kullanılarak tekrarlanmış ve işlem sürelerine dayalı paralel işlemlerdeki hızlanma ve verim eğrileri çıkarılmıştır (Şekil 26).



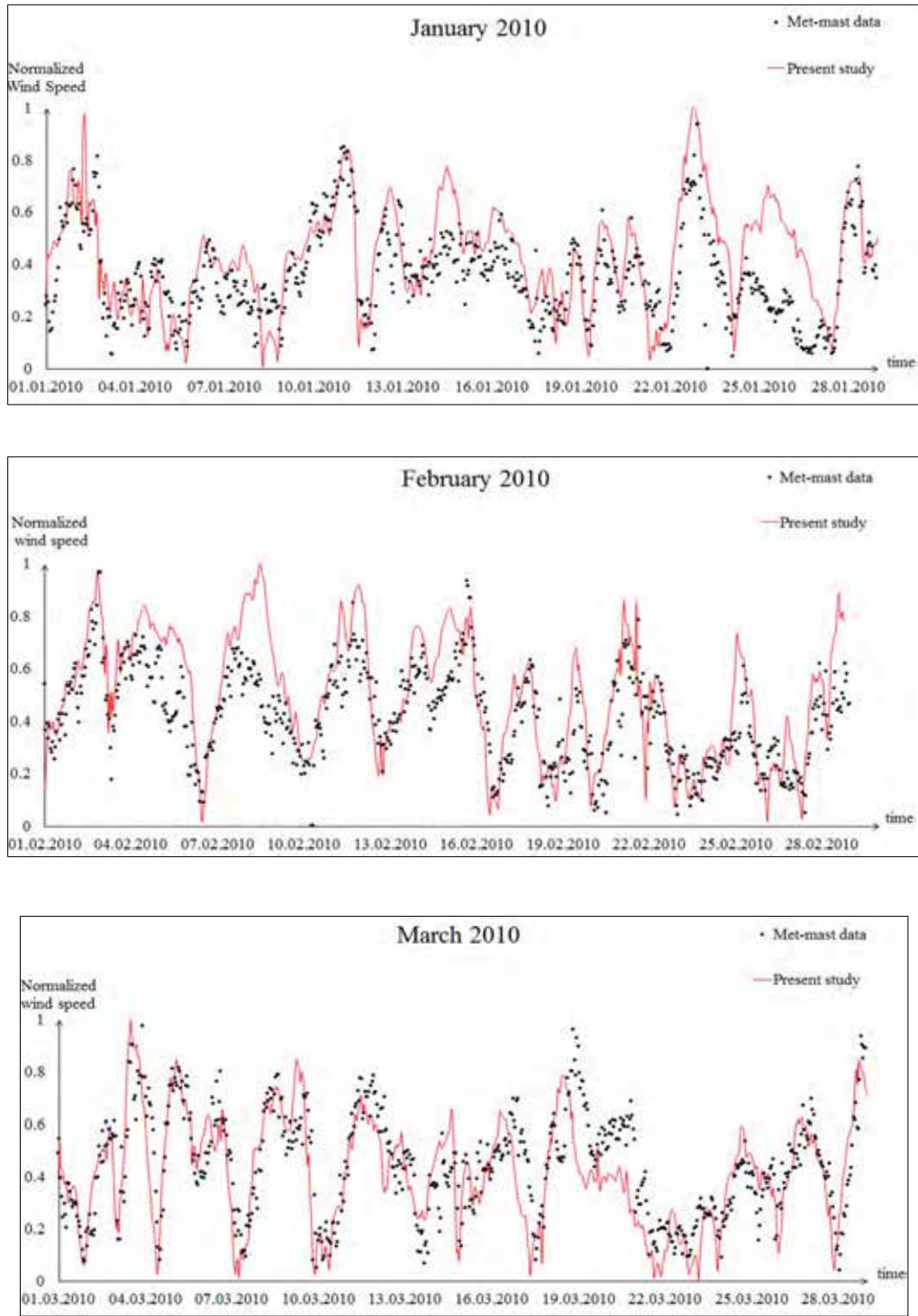
Şekil 4.40 Paralel işlem hızlanma grafiği

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi WRF'dan elde edilen sınır koşullarının paralel hesaplamalar süresince yönetici işlem (process) tarafından işçi işlemlere gönderildiği paralel hesaplamalarda paralel verimlilik %75'in üzerindedir. 48 çekirdek kullanılarak yapılan çözümde görülen %125 verimlilik çekirdek başına düşen hücre sayıları ve CPU'daki kaşe (cache) boyutu arasındaki uyumlu bir eşleşmeden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

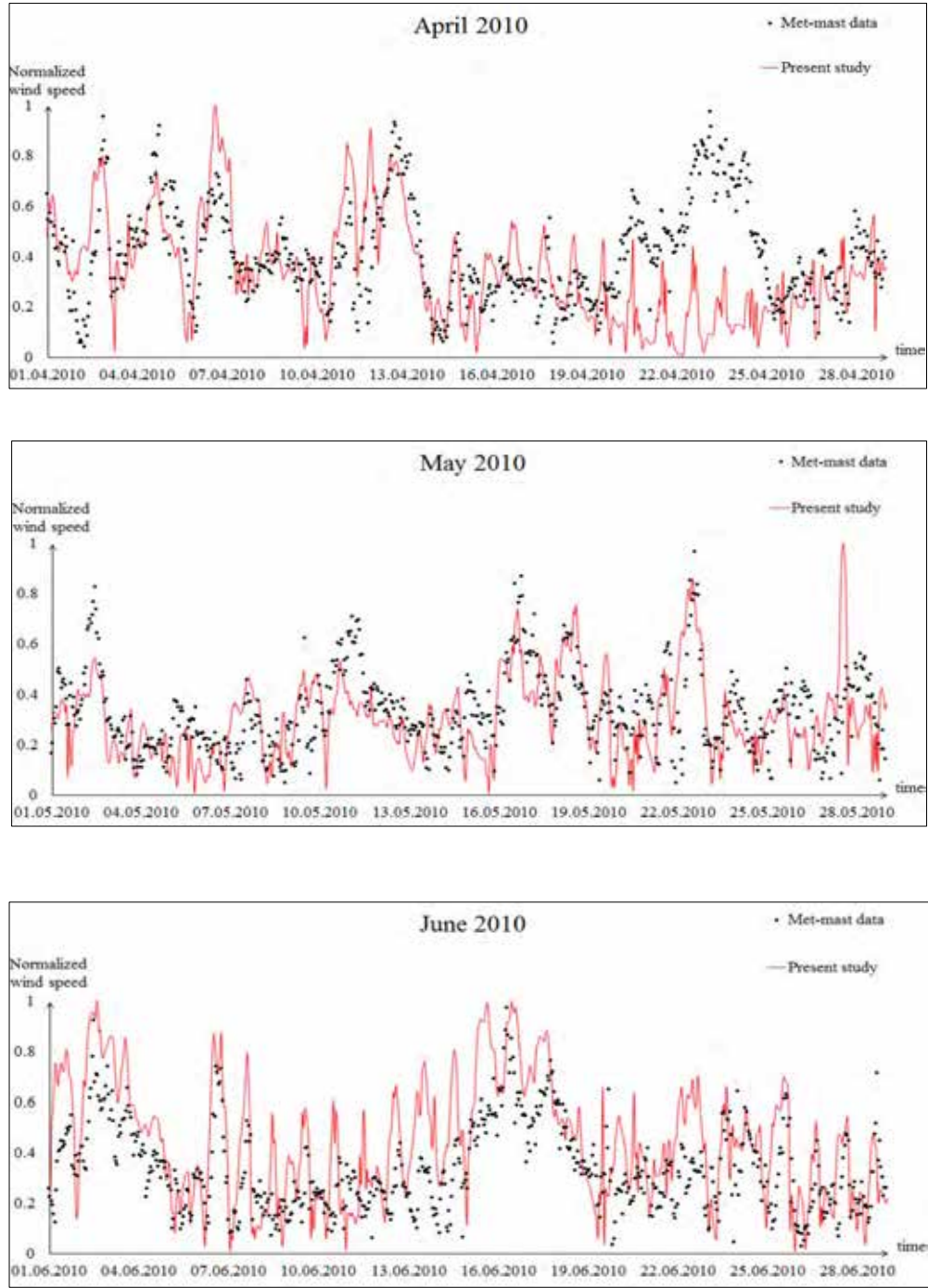
4.4.5 Uzun Dönemli Hesaplamalar ve Yıllık Rüzgar Alanı Değerlendirmeleri

Doğrulama çalışmalarının ardından uzun dönemli rüzgar alanı değerlendirme analizleri yapmak amacıyla, bir yıllık bir süre için aylık periyodlarla WRF ile akupile edilmiş HYP3D ile Mersin-Mut bölgesinde atmosferik akış çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çözümler için zaman aralığı 01.01.2010 ve 15.12.2010 olarak alınmıştır. Bu zaman aralığında ölçüm istasyonu gözlem verisi de elde edilmiştir.

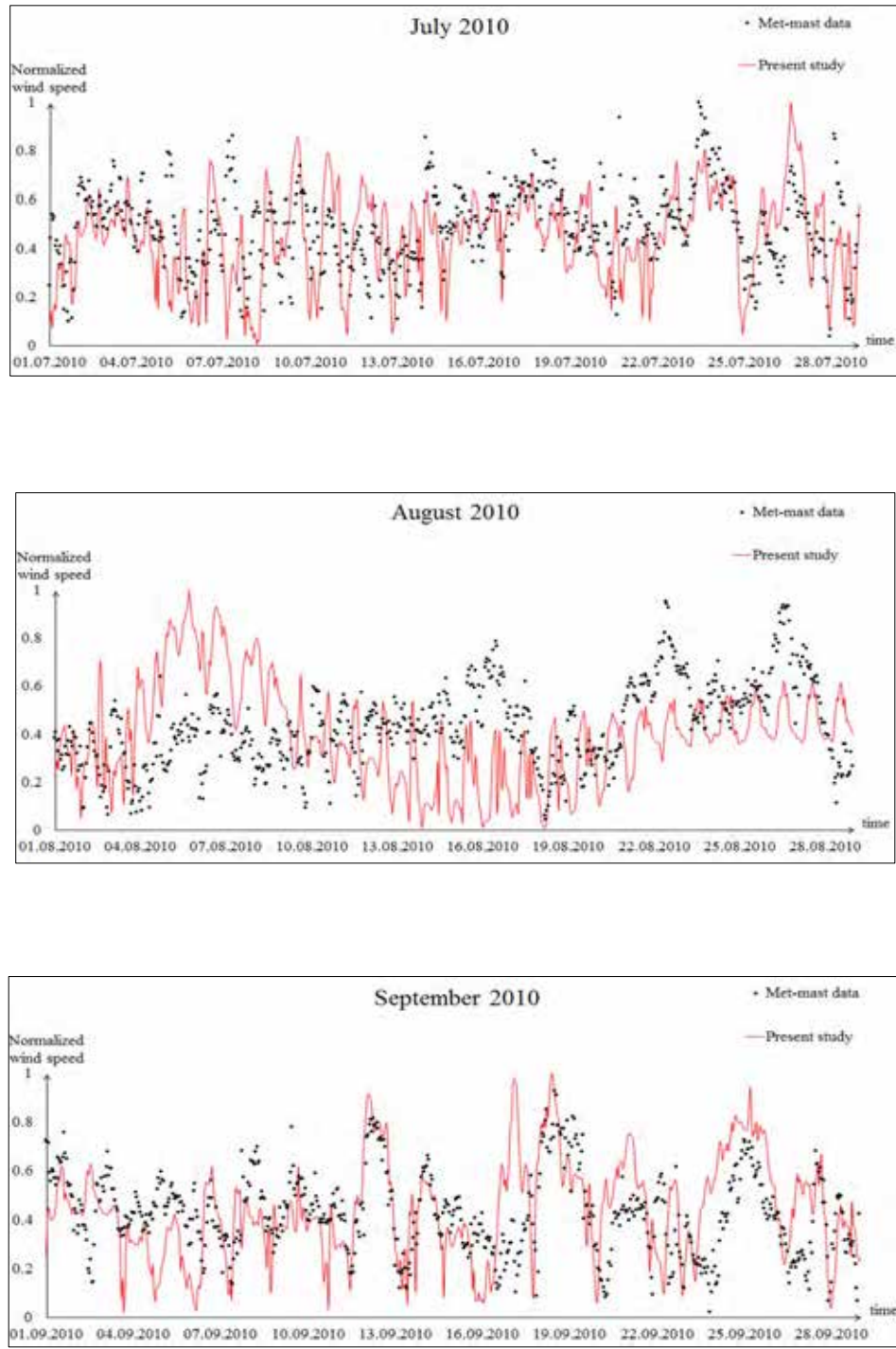
Öncelikle yıllık WRF çözümleri NCEP (National Centers for Environmental Prediction) den alınan aylık sınır koşulları ile 12 aylık bir süre için elde edilmiştir. Elde edilen bu WRF çözümlerinden HYP3D için gerekli olan zamana bağlı sınır koşulları çıkarılmış, ardından HYP3D ile topografyanın yüksek çözünürlükle modellendiği çözüm ağı üzerinde aylık periyodlarla zamana bağlı akış çözümleri elde edilmiştir. Yıllık HYP3D çözümleri, her bir aylık çözüm için aynı anda 16 çekirdek kullanılarak toplam 192 işlemci ile yaklaşık 15 günde elde edilmiştir. Hesaplanan rüzgar alanları daha sonra detaylı bir analiz yapılabilmesi amacıyla bir saatlik periyodlarla depolanmıştır. Ölçüm istasyonu gözlem verilerinin alındığı yerden 71.4m yükseklikteki noktada hesaplanan rüzgâr hızları ve gözlem verileri aylık periyodlarla Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44 'de karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi HYP3D tahminleri gözlem verileri ile genelde uyumludur, ancak bazı günlerde aradaki farkın %50 'ye kadar çıktığı görülmektedir. Ayrıca nümerik tahminlerin sonbahar ve kış aylarında gözlem verisiyle daha uyumlu, ilkbahar ve yaz aylarında ise aradaki ortalama farkın büyüdüğü gözlenmektedir.



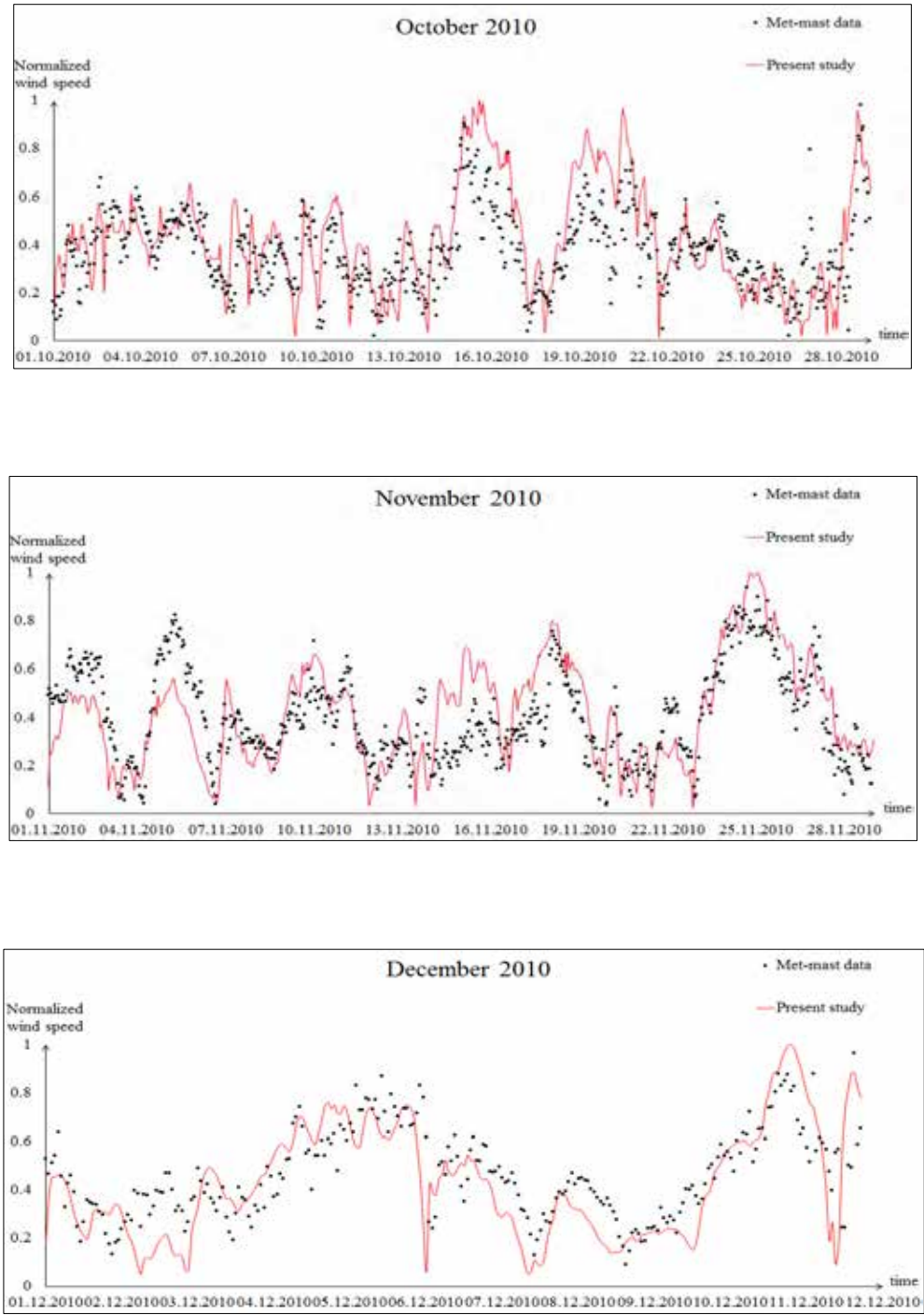
Şekil 4.41 HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [ocak-mart]



Şekil 4.42 HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [nisan-haziran]



Şekil 4.43 HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [temmuz-eylül]

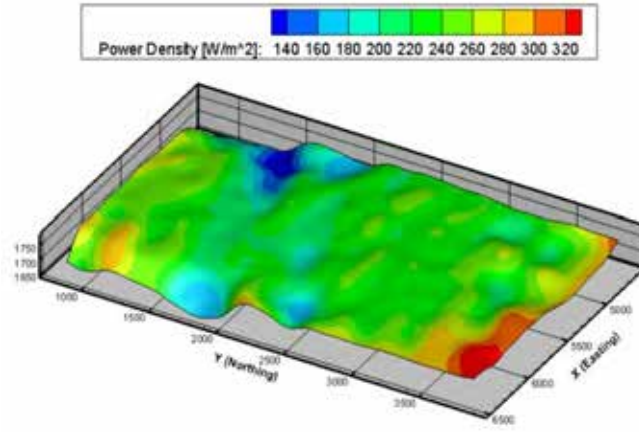


Şekil 4.44 HYP3D-WRF akuple sonuçların gözlem verileri ile kıyaslanması [ekim-aralık]

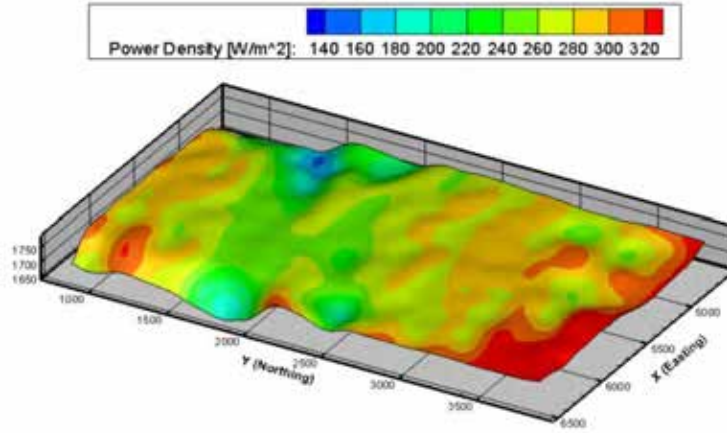
4.4.5.1 Yıllık Ortalama Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası

2010 yılı için elde edilen atmosferik akış çözümleri daha sonra 80 ve 100 metre yüksekliklerde güç yoğunluğu (power density) dağılım haritalarını elde etmek üzere işlenmiştir (Şekil 4.47 ve Şekil 4.45) Şekillerde görüldüğü gibi bölgenin kuzeydoğu köşesi her iki yükseklik için en yüksek rüzgar güç yoğunluğuna sahiptir. Ancak 100 metre yükseklikteki yüksek güç yoğunluğu daha geniş bir alanı kapsamaktadır. İki yükseklik arasındaki güç yoğunluğu farkı Şekil 4.46 'te verilmektedir. Farklı yüksekliklerde yapılan nümerik analizler en iyi türbin göbek yüksekliği elde etmek için kullanılabilir.

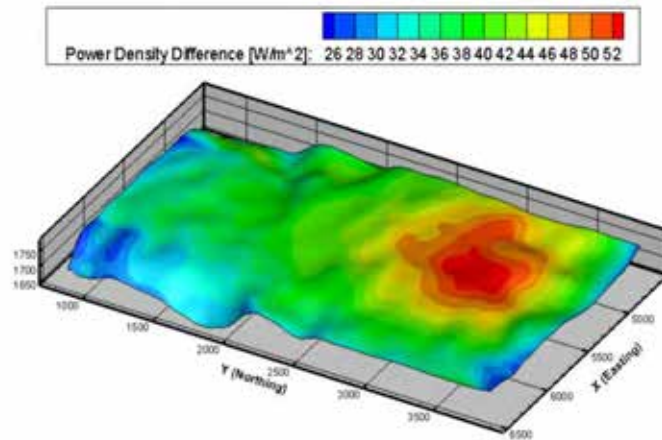
Güç yoğunluğu değerlerinin seçilen türbin kanadının süpürme alanı ile çarpılması teorik rüzgar güç potansiyelini verir. Betz limiti ve türbin verimliliği göz önünde bulundurularak, anlık güç üretimi Şekil 4.47 ve Şekil 4.45 kullanılarak kabaca tahmin edilebilir.



Şekil 4.47 80m yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu haritası



Şekil 4.45 100m yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu haritası

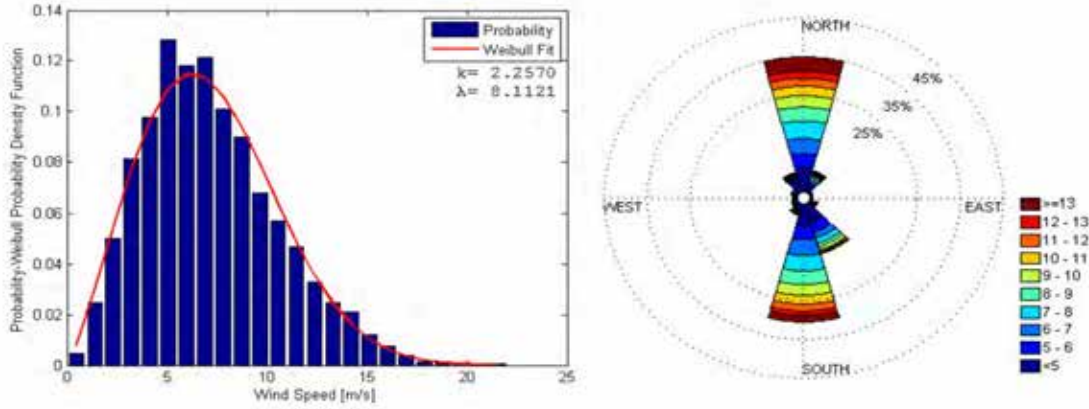


Şekil 4.46 80 ve 100 metre yüksekliklerdeki güç potansiyel farkları

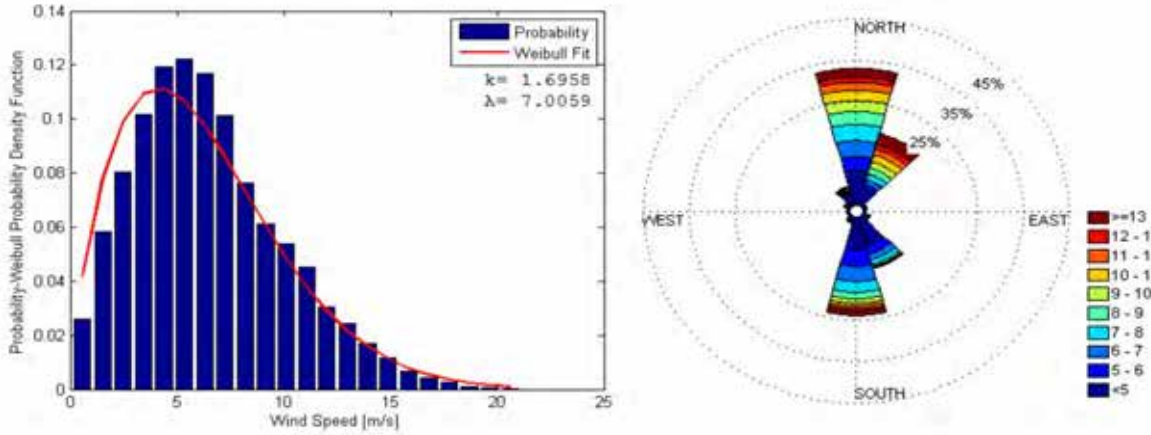
4.4.5.2 Weibull Dağılımı Analizleri

Rüzgar alanı analizlerinde Weibull dağılımları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. HYP3D ile yapılan çözümlerde her çözüm hücresindeki rüzgarın değer ve yön sınıflandırması her zaman adımıyla yapılarak ortalama dağılımlar elde edilebilmektedir. Ardından ortalama dağılım için Weibull olasılık fonksiyonunun şekil ve ölçek katsayıları hesaplanabilir.

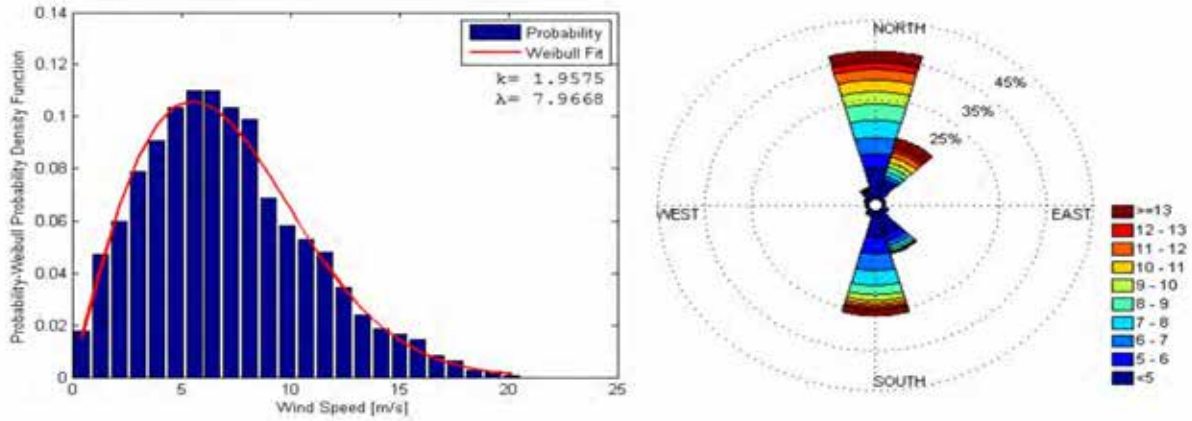
Ölçüm istasyonunun bulunduğu noktada ölçüm istasyonundan, WRF çözümlerinden ve WRF ile akuple edilmiş HYP3D çözümlerinden elde edilen bir yıllık döneme ait ortalama Weibull ve rüzgar gülü dağılımları Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50 'da verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi tüm sonuçlar genel olarak uyum içindedir. Ancak HYP3D çözümlerinde elde edilen şekil ve ölçek katsayıları gözlem verileriyle elde edilen değerlere daha yakındır.



Şekil 4.48 Gerçek gözlem verilerinin Weibull dağılımı ve rüzgar gülü



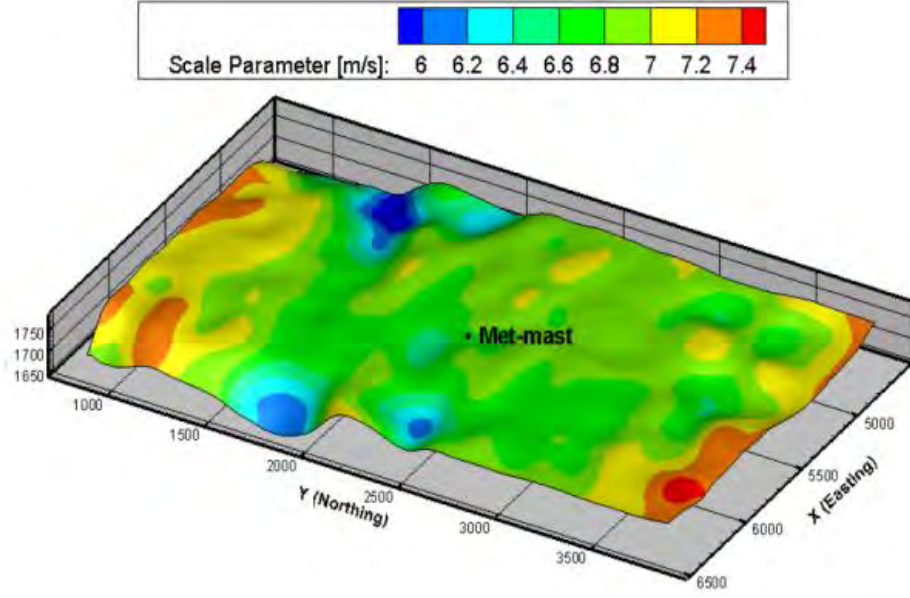
Şekil 4.49 WRF çözümlerinin Weibull dağılımı ve rüzgar gülü



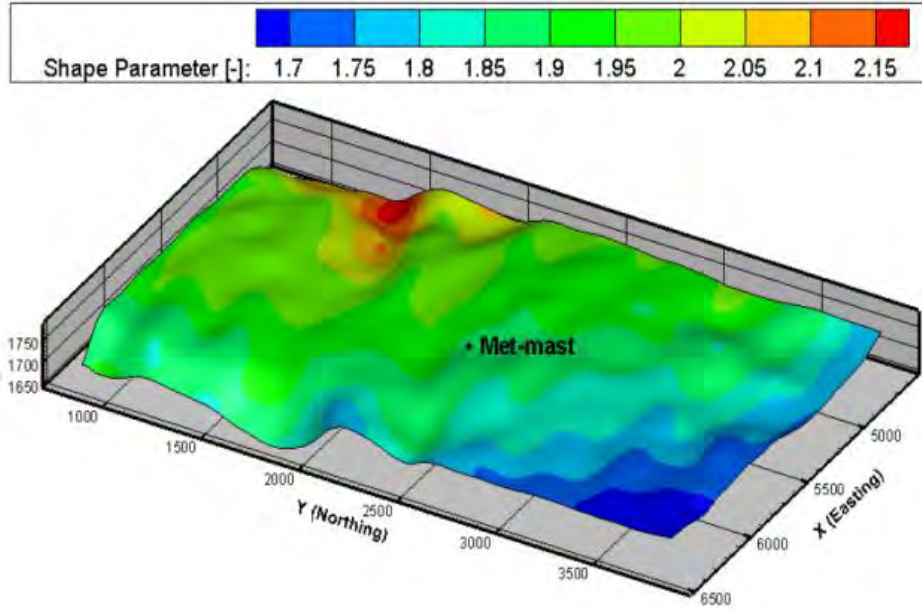
Şekil 4.50 WRF-HYP3D akuple çözümlerin Weibull dağılımı ve rüzgar gülü

Weibull olasılık fonksiyon katsayıları olan şekil (k) ve ölçek (λ) katsayıları, çözüm alanındaki her düğüm noktası için 1 yıllık sonuç verileri kullanılarak hesaplanabilir. λ en olası ortalama rüzgar hızıyla alakalıyken, k dağılımın genişliğini göstermektedir. Yüksek k değerleri, λ değeri etrafında yoğunlaşmış bir dağılımı işaret ederken, düşük k değerleri, dağınık bir dağılım belirtmektedir. Şekil ve ölçek katsayılarının yeryüzünden 80 metre yükseklikteki dağılımları Şekil 4.51 ve Şekil 4.52 'te verilmiştir. Genel olarak, maksimum rüzgâr gücü üretimi için iki katsayısı da yüksek olmalıdır.

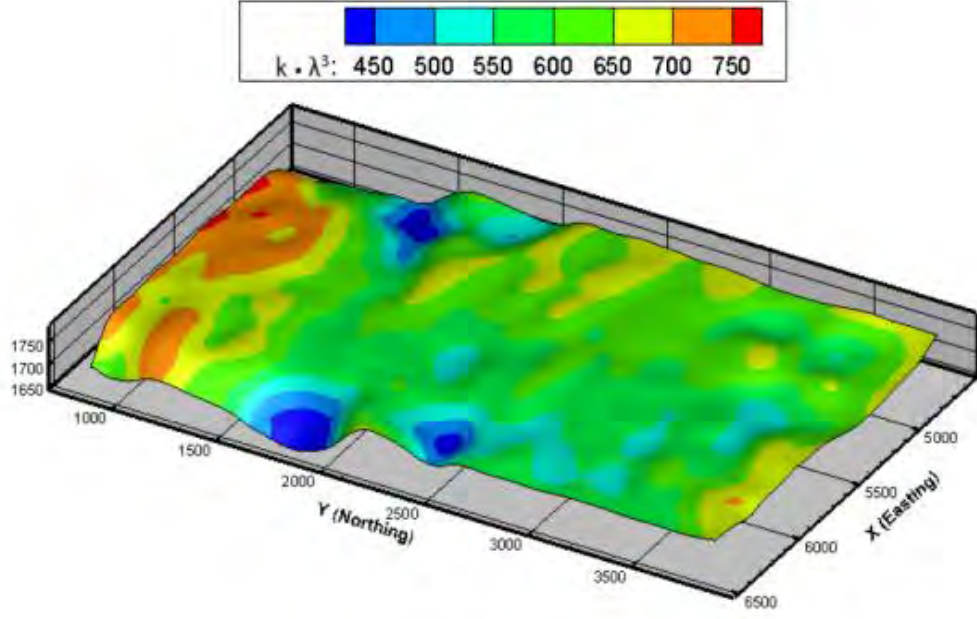
Bu iki katsayıyı da için alan yeni bir parametre, $k \cdot \lambda^3$, tanımlanmıştır. Rüzgar gücünün, rüzgar hızının küpüyle orantılı olmasından dolayı, bu parametre potansiyel rüzgar enerjisi için iyi bir gösterge olabilir. 80 metre yükseklikteki $k \cdot \lambda^3$ dağılımı Şekil 4.53 'da verilmiştir. Kuzeybatı bölgesinin yanında, bölgenin güney kesiminin de yüksek $k \cdot \lambda^3$ dağılımına sahip olduğu gözlenmiştir, ki bu bölge de olası rüzgar türbini yerleşkesi olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.51 Yerden 80m yükseklikte ölçek (λ) katsayısı dağılımı



Şekil 4.52 Yerden 80m yükseklikte şekil (k) katsayısı dağılımı

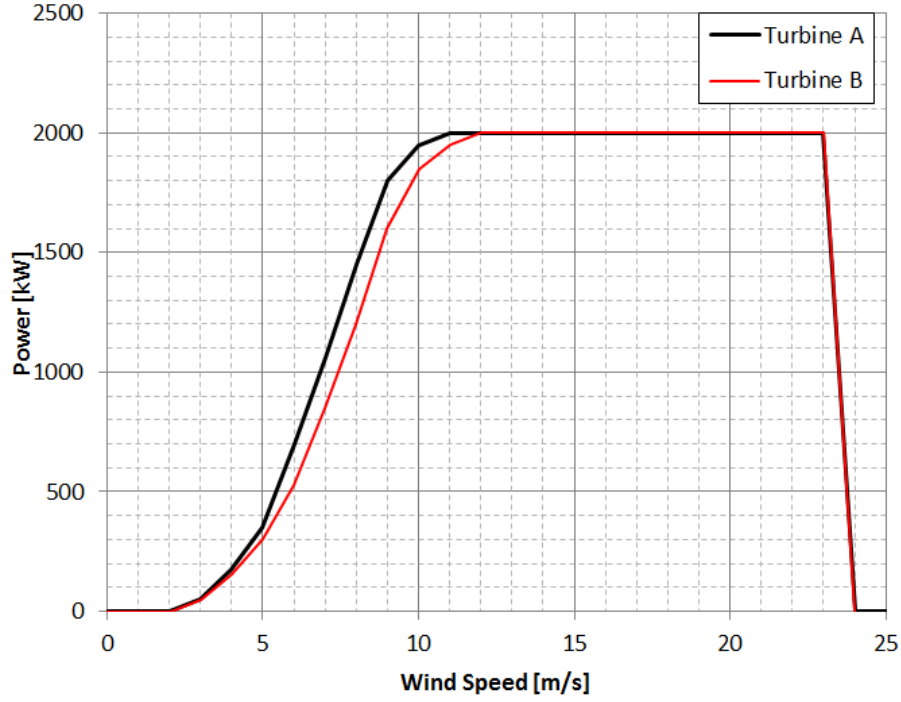


Şekil 4.53 Yerden 80m yükseklikte ($k\lambda^3$) parametresi dağılımı

4.4.5.3 Yıllık Enerji Üretimi Tahmini

Herhangi bir türbin göbek yüksekliğinde yıllık ortalama rüzgar hızları ile oluşturulan Weibull dağılımı ve rüzgar türbininin güç eğrisi kullanılarak yıllık rüzgar enerjisi tahmini yapılabilir.

Bu çalışmada güç eğrileri Şekil 4.54’de verilen, türbin göbek yükseklikleri 80m olan iki adet tipik 2MW gücünde rüzgâr türbini değerlendirilmiştir. Şekilde görüldüğü “Türbin A” düşük hızlarda daha verimlidir.

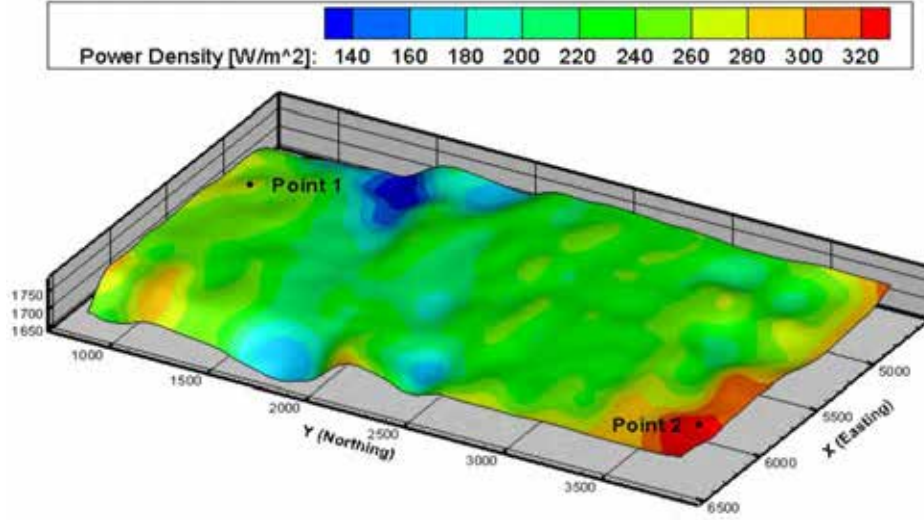


Şekil 4.54 Farklı 2 türbinin güç eğrileri

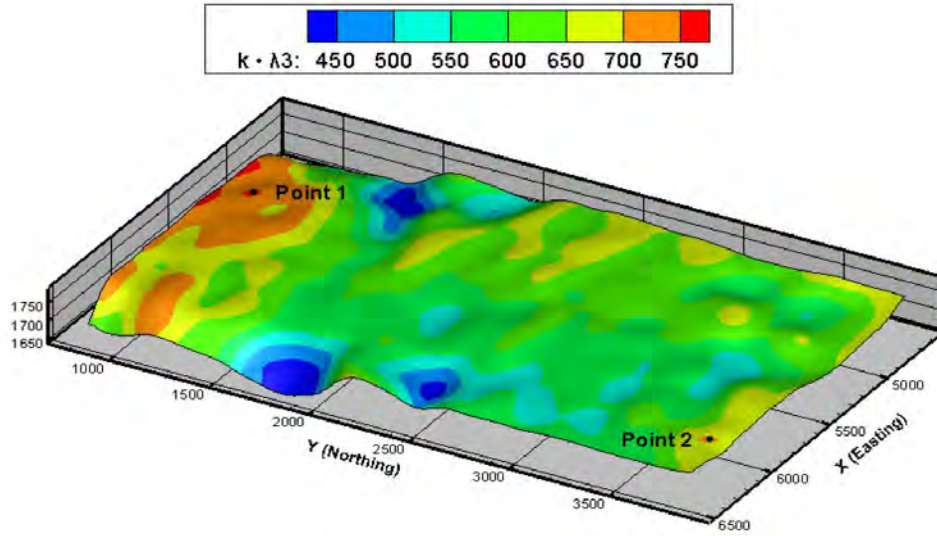
Mersin-Mut bölgesinde 80 metre yükseklikteki güç yoğunluğu dağılımı Şekil 4.55'de verilmiştir. Ek olarak, $k.\lambda^3$ dağılımı da Şekil 4.56 'da verilmiştir. Bu dağılımlara bağlı olarak, maksimum yıllık enerji üretimi konumları, Nokta 1 ve Nokta 2 olarak tanımlanmıştır. Nokta 1, $k.\lambda^3$ parametresinin maksimum olduğu yerde konumlandırılırken, Nokta 2, güç yoğunluğunun maksimum olduğu yerde konumlandırılmıştır. Nokta 1 ve Nokta 2 için Weibull eğrileri, Weibull katsayıları ve rüzgar gülü dağılımları Şekil 4.57'de gösterilmiştir. Nokta 2'nin güç yoğunluğunun (341 W/m^2), Nokta 1'inkinden (266 W/m^2) yüksek olmasına rağmen, Nokta 2'nin katsayı değeri ($928 \text{ m}^3/\text{s}^3$) Nokta 1'inkinden ($1040 \text{ m}^3/\text{s}^3$) daha düşüktür.

Türbin A ve Türbin B'nin Nokta 1 ve Nokta 2'deki ortalama güç üretimleri ve yıllık enerji üretimi tahminleri, Weibull dağılımı ve türbinlerin güç eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, Tablo 3'te verilmektedir. Türbin A'nın iki konumda da maksimum gücü ürettiği gözlenmiştir. Ancak Türbin B, Nokta 2'de, güç yoğunluğu dağılımının düşük ama $k.\lambda^3$ değerinin yüksek olduğu durumda maksimum gücü üretmektedir. Bu sonuçlar, $k.\lambda^3$ parametresinin rüzgar türbinlerinin mikro-konuşlandırılmasında (micro-siting) önemli bir katsayı olabileceğini göstermektedir.

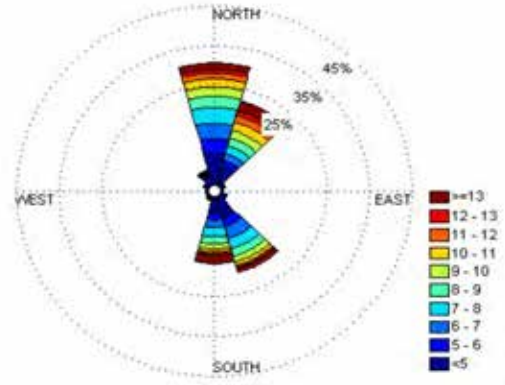
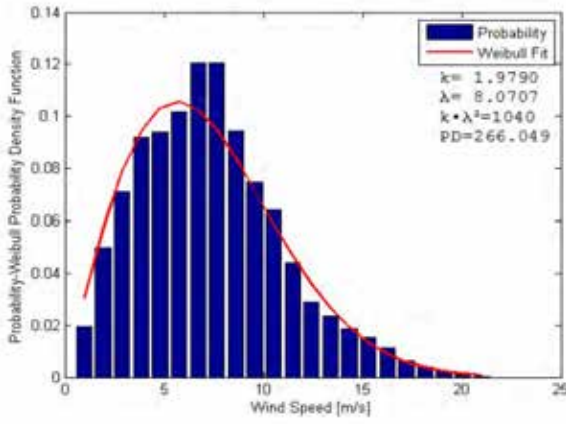
Türbinlerin güç eğrilerinin bulunduğu durumlarda çözüm ağının her hücresindeki Weibull dağılımları kullanılarak her türbin için yıllık enerji üretim haritaları da oluşturulabilir. Şekil 4.58 'da bu çalışmada kullanılan A ve B türbinleri için elde edilen, üretilen maksimum güç ile normalize edilmiş yıllık enerji üretim haritaları verilmektedir.



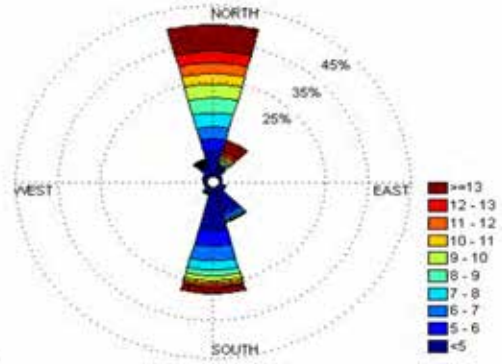
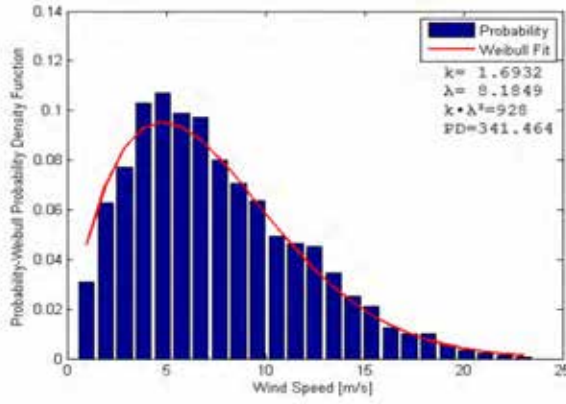
Şekil 4.55 Seçilen noktaların güç yoğunluğu tahmini üzerindeki konumu



Şekil 4.56 Seçilen noktaların $k\lambda^3$ dağılımı üzerindeki konumu



a) 1. Nokta

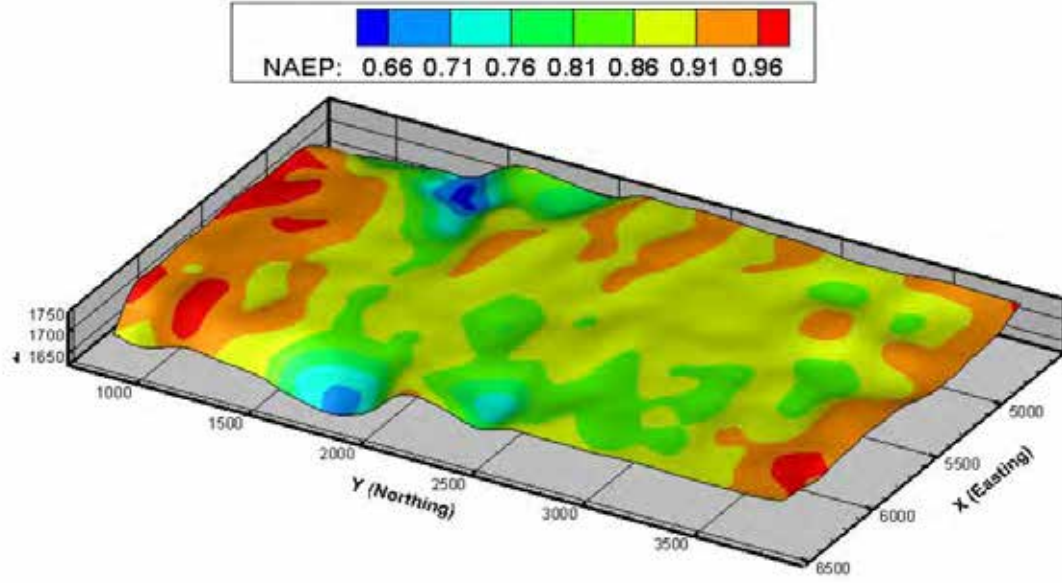


b) 2. Nokta

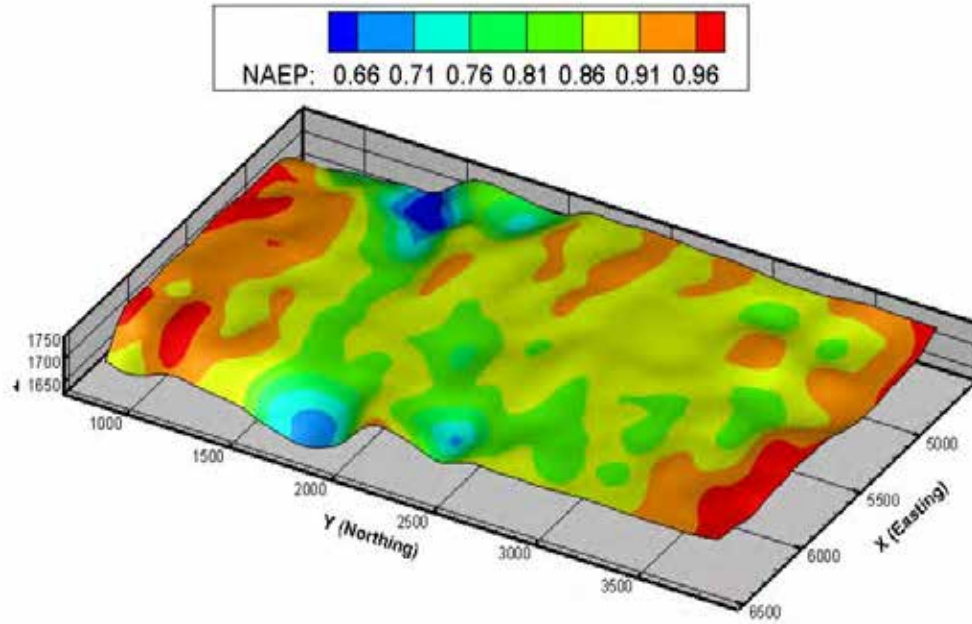
Şekil 4.57 Seçilen noktaların Weibull dağılımları ve rüzgar gülleri

Tablo 3 Türbin A ve Türbin B'nin nokta 1 ve nokta 2 üzerindeki yıllık enerji üretim değerleri

Model	Konum	Güç Yoğunluğu [W/m^2]	$k\lambda^3$	Ortalama Güç [kW]	Yıllık enerji üretimi [MWh/y]
Türbin A	Nokta 1	266.049	1040	923.32	8088
	Nokta 2	341.646	928	907.14	7946
Türbin B	Nokta 1	266.049	1040	828.84	7260
	Nokta 2	341.464	928	833.47	7301



a) Türbin A



b) Türbin B

Şekil 4.58 Farklı türbinler için normalize edilmiş yıllık enerji üretimi

4.4.5.4 SGS Kapalı Çözüm Yöntemiyle Önçalışmalar

Son dönemde geliştirilen iteratif kapalı SGS çözüm yöntemi ile düz levha üzerindeki sınır tabaka çözümü ile atmosferik akuple akış çözümleri üzerinde önçalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda düz levha üzerindeki laminar ve türbülanslı akış için hız profilleri başarıyla hesaplanmış, laminar akış çözümünde maksimum CFL sayısı 220, türbülanslı çözümde ise 100 ile stabil çözümler elde edilmiştir. Ancak WRF-HYP3D akuple atmosferik akış çözümlerinde maksimum CFD 18 ile sınırlı kalmıştır. Ayrıca SGS yöntemi akı jakobiyanı hesaplamalarından dolayı RK3'e göre herbir zaman adımında yaklaşık %120 daha fazla CPU zamanı kullanmaktadır. Bu durumda SGS yöntemi RK3 yöntemine göre atmosferik akışlarda yaklaşık 4 kat hızlanma ($18/2/2.2=4.09$) sağlamıştır. SGS yöntemi ile doğrulama ve değerlendirme çalışmalarımız devam etmektedir.

4.5 Sonuç

Projenin ana amacı olan ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümünde geliştirilmekte olan 3 boyutlu Navier-Stokes çözücü HYP3D ile orta ölçekli hava tahmin yazılımı WRF'nin akuple olarak paralel hesaplama ortamında çalıştırılması başarıyla sağlanmıştır. Akuple çözümlerle uzun dönemli (1 yıllık) atmosferik akış çözümleri elde edilmiş, 3 boyutlu rüzgar güç potansiyeli dağılımları ile çözüm bölgesi farklı rüzgar türbin karakteristiklerine göre yer seçimi için değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ana adımları ve elde edilen sonuçlar şunlardır.

- HYP3D akış çözücüsüne Splart-Allmaras türbülans modeli adapte edilmiş ve düz levha üzerindeki sınır tabakası için doğrulama çalışmaları yapılmıştır.
- HYP3D çözümleri için yüksek çözünürlüklü topografya bilgisi ASTER GDEM sunucusundan alınarak yapılı, yapısız ve hibrit çözüm ağları oluşturulmuştur.
- HYP3D çözüm ağının dış hücrelerinde uygulanacak akuple sınır şartları için bu hücrelerin merkez koordinatlarının öncelikle WRF çözüm ağında lokalize edilmesi yöntemi geliştirilmiş, ve bu noktalardaki akış değişkenleri zaman bağlı WRF çözümlerinden 5 dakikalık aralıklarla alınarak HYP3D çözümlerinde kullanılacak sınır koşullarını içeren veri setleri elde edilmiştir.
- HYP3D ve WRF çözüm ağlarındaki çözünürlük farkından kaynaklanan interpolasyon problemleri çözüm ağının lokal olarak kaydırılıp esnetilmesiyle aşılmıştır
- HYP3D çözümlerinde veri setlerinden okunan akuple sınır koşullarının çözüm ağının bölündüğü (domain decomposition) paralel hesaplamalarda kullanılması sağlanmıştır.
- Mersin Mut bölgesinde kurulu bir rüzgar santralindeki ölçüm istasyonundan (met mast) 2010 yılına ait ölçüm verileri elde edilmiştir.
- Mersin-Mut bölgesi için WRF çözümlerinde kullanılacak başlangıç ve sınır koşulları NCEP (National Centers for Environmental Prediction)'den sağlanarak WRF ile uzun dönemli çözümler elde edilmiştir. Bu çözümlerle birlikte HYP3D için sınır koşulu setleri hazırlanmıştır.
- Geliştirilmiş olan HYP3D-WRF akuple çözüm yöntemiyle elde edilen kısa dönemli çözümler gözlem verileri ve WRF çözümleri ile doğrulanmıştır. Beklenildiği gibi, akuple çözümlerle WRF çözümleri arasındaki fark yerden uzaklaştıkça azalmaktadır. Akuple

Çözümlerin daha detaylı değerlendirilmesi için kapsamlı ölçüm istasyonu verilerine gereksinim vardır.

- Spalart-Allmaras türbülans modeli ile yüzey pürüzlülüğünün detaylı bir şekilde incelenebilmesi için yere dik yönde zm ağı znrlğnn artırılması gerekmektedir. Ancak kullanılan RK3 tabanlı açık (explicit) zm yönteminde zaman adımı sınırlamasından ($CFL < 1$) dolayı çok yüksek znrlkl zm ağlarında zamana bağlı uzun süreli zmler elde edilememiştir
- Projenin son döneminde HYP3D akış zcsne simetrik Gauss-Seidel (SGS) yöntemi ile kapalı (implicit), iteratif zaman entegrasyonu yapabilme kabiliyeti kazandırılmıştır. Türbülanslı akışlarda SGS yöntemi ile zaman adımını belirleyen CFL değeri 10'a kadar artırılmıştır.
- HYP3D-WRF akuple üzümlerinde paralel hesaplama performansının 64 işlemciye kadar %75'in üzerinde olduğu gösterilmiştir.
- HYP3D-WRF ve WRF zmlerinde rüzgar alanlarının değerlendirilebilmesi için rüzgar güç potansiyeli, Weibull eğrisi ve rüzgar gülü dağılımları elde edilmiştir. ,
- Weibull eğrisi katsayılarından oluşturulan yeni bir rüzgar güç potansiyeli gösterge parametresi, $(k\lambda^3)$ tanımlanmıştır. Bu parametrenin yerden belirli yüksekliklerde dağılımı incelenerek g üretim eğrileri farklı tipik rüzgar türbinleri için yer şeimi değerlendirilmesi yapılmıştır.
- zm alanında hesaplanan Weibull eğrisi verileri ve tipik rüzgar türbini güç eğrileri kullanarak her rüzgar türbinine zgn yıllık enerji üretim tahmin haritaları elde edilmiştir.

4.6 Referanslar

Ahmet, G. 2015. "Micro-Siting Of Wind Turbines Using Navier-Stokes Solutions Coupled With A Numerical Weather Prediction Model" PhD. Thesis, METU Aerospace Eng.

Aupoix, B., Spalart P. R., 2003. "Extensions of the Spalart-Almaras turbulence model to account for wall roughness" International Journal of Heat and Fluid Flow, 24, 454-462

Blocken, B., Stathopoulos T., Carmeliet J., 2007. "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems", Atmospheric Environment, 41, 238-252

Cochran, B.C., 2002. "The Influence of Atmospheric Turbulence on the Kinetic Energy Available During Small Wind Turbine Power Performance Testing", IEA Expert Meeting on: Power Performance of Small Wind Turbines, CEDER-CIEMAT, Soria, Spain

Cochran, B.C., Damiani, R.R., 2008. "Harvesting Wind Power from Tall Buildings", WindPower 2008, Houston, Texas

Damiani, R., Cochran, B., Orwig, K., Peterka, J., 2008. "Complex Terrain: A Valid Wind Option?", American Wind Energy Association, Poster

Derickson, R.G., Peterka, J.A., 2004. "Development of a Powerful Hybrid Tool for Evaluating Wind Power in Complex Terrain" Atmospheric Numerical Models and Wind Tunnels, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA

Karypis, G., Kumar V. 1999. "A fast and highly quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs." SIAM Journal on Scientific Computing, 20, 359-392

Kristóf, G., Rácz, N., Balog, M., 2009. "Adaptation of Pressure Based CFD Solvers for Mesoscale Atmospheric Problems", Boundary-Layer Meteorology, 131, 85-103

Landberg, L., Myllerup, L., Rathmann, O., Petersen, E.L., Jørgensen, B.H., Badger, J. and Mortensen, N.G., 2003. "Wind Resource Estimation—An Overview", Wind Energy, 6, 261-271.

Leblebici, E., 2012. "Terrain Modeling and Atmospheric Turbulent Flow Solutions Based on Meteorological Weather Forecast Data" Msc. Thesis, METU Aerospace Eng.

Mesoscale & Microscale Meteorology Division - National Center for Atmospheric Research "User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.5" http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf Son erişim tarihi: 12.5.2015

Montavon, C., 1998. "Simulation of atmospheric flow over complex terrain for wind power potential assessment", Doctoral thesis, EPFL, Lausanne.

Mortensen, N.G., Bowen, A.J., Antoniou I. 2006. "Improving Wasp Predictions In (Too) Complex Terrain", Proceedings of the 2006 European Wind Energy Conference and Exhibition, Athens, Greece

Mortensen, N.G., Heathfield, D.N., Myllerup, L., Landberg, L., Rathmann O. 2007. "Getting Started with WASP 9", Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark

Mortensen, N.G., Hansen, J.C., Badger, J., Jorgensen, B.H., Hasager, C.B., Paulsen, U.S., Hansen, O.F., Enevoldsen K., Youssef, L.G., Said, U.S., Moussa, A.A.E., Mahmoud, M.A., Yousef, A.E.S., Awad, A.M., Ahmed, M.A.R., Sayed, M.A.M., Korany, M.H., M.A.B.T Tarad 2006. "Wind Atlas For Egypt: Measurements, Micro-And Mesoscale Modelling", Proceedings of the 2006 European Wind Energy Conference and Exhibition, Athens, Greece, 10 pp.

Peltier, L.J., Wyngaard, J.C., 2006. "High Fidelity Modeling Of Urban Features", 14th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Assoc.

Politis, E.S., Chaviaropoulos, P.K., 2008. "Micrositing and classification of wind turbines in complex terrain", 2008 European Wind Energy Conference and Exhibition Brussels, Belgium

Sarma, A., Ahmad, N., Bacon, D., Boybeyi, Z., Dunn, T., Hall, M., Lee, P. 1999. "Application of adaptive grid refinement to plume modeling air pollution" VII. WIT Press, Southampton, 59–68.

Strangroom, P. 2004. "CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain", PhD Thesis, The University of Nottingham.

Yamada, T. 2003. "Numerical simulation of airflows around buildings by using a mesoscale atmospheric model", Air&Waste Management Associations 96th annual conference and exhibition, San Diego, CA 23–25.

Yilmaz, E. 2009. Extreme Wind and Air Quality Modeling/Simulation for a Metropolitan Area, Purdue School of Engineering and Technology, IUPUI, Indianapolis, IN, Presentation

Zajackowski Frank J., SueEllenHaupt, Schmehl Kerrie J. 2011. "A preliminary study of assimilating numerical weather prediction data into computational Fluid Dynamics models for wind prediction", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99, 320-329.

Zheng, M.H., Guo, Y.R., Ai X.Q., Qin T. 2010. "Coupling GIS with CFD Modeling to Simulate Urban Pollutant Dispersion", Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference Wuhan, China.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. İSMAİL HAKKI TUNCER
Proje No:	112M104
Proje Başlığı:	Rüzgar Türbinlerinin Mikro Düzeydeki Yer Seçimi İçin Navier-Stokes Akış Çözücüsünün Topoğrafik Yapısız Çözüm Ağlarında Geliştirilmesi ve Kullanılması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	GÖKHAN AHMET
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/11/2012 - 15/05/2015
Onaylanan Bütçe:	191225.0
Harcanan Bütçe:	77487.15
Öz:	<p>Bu çalışmada türbülanslı atmosferik akış çözümlerinin elde edilmesi amacıyla kurum içinde geliştirilen paralel hesaplama ortamında çalışabilen 3 boyutlu Navier-Stokes çözücü HYP3D, Mezo ölçekli meteorolojik tahmin yazılımı WRF ile akuple edilerek yüksek çözünürlüklü topografya üzerinde uzun dönemli rüzgar akış alanları ve rüzgar enerji potansiyeli hesaplanmıştır. Atmosferik gözlem verileri temin edilen bir araştırma bölgesi için yüksek çözünürlüklü (1,5 arcsec, 30m) topografya haritası (DEM) temin edilmiş, bu topoğrafya verisi ile üretilen yapıli ve hibrit hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözüm ağları oluşturulmuştur. Akuple çözümlerin elde edileceği çözüm alanı için zamana bağlı başlangıç ve sınır koşulları, yaygın olarak kullanılan, açık kaynak kodlu meteorolojik tahmin yazılımı WRF' ile elde edilen 1km çözünürlüklü zamana bağlı akış çözümlerinde dakikalık zaman aralıkları için elde edilmiştir.</p> <p>WRF ile akuple edilen yüksek çözünürlüklü Navier-Stokes çözümleri bir yıllık bir zaman aralığı için elde edilmiştir. Zamana bağlı akış çözümlerinde elde edilen akış alanları rüzgar hızının eşdeğer çizgileri, zaman serileri, Weibull dağılımları ve rüzgar gülü grafikleri ile değerlendirilmiştir. Akış değişkenleri, gerçek gözlem verileri ve WRF sonuçları ile kıyaslanmış, paralel hesaplamalar için performans değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca güç üretim eğrileri verilen örnek rüzgar türbinleri için yıllık enerji üretim haritaları elde edilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri için yer seçimi, WRF, Navier-Stokes, Weibull, rüzgar gülü
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Projenin Yapılan Yayınlar:	<p>1- Atmospheric turbulent flow solutions coupled with a Mesoscale weather prediction model (Bildiri)1- CFD Coupled with WRF for Wind Power Prediction (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),</p> <p>2- Nümerik Hava Tahmin Yazılımlarıyla Akupile Edilmiş Yüksek Çözünürlüklü Atmosferik Akış Çözümleri (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>3- Terrain Fitted Turbulent Flow Solutions Coupled with a Mesoscale Weather Prediction Model (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>4- TERRAIN FITTED TURBULENT FLOW SOLUTIONS COUPLED WITH A MESOSCALE WEATHER PREDICTION MODEL (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>5- UNSTEADY ATMOSPHERIC TURBULENT FLOW SOLUTIONS COUPLED WITH A MESOSCALE WEATHER PREDICTION MODEL (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>6- ATMOSPHERIC TURBULENT FLOW SOLUTIONS COUPLED WITH A MESOSCALE WEATHER PREDICTION MODEL (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>7- WIND POTENTIAL ESTIMATIONS BASED ON UNSTEADY TURBULENT FLOW SOLUTIONS COUPLED WITH A MESOSCALE WEATHER PREDICTION MODEL (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p>
----------------------------	--

TÜBİTAK